

UNIVERSIDAD DE ATACAMA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

**RECUPERACIÓN DE IONES METÁLICOS VALIOSOS CONTENIDOS EN LAS  
SALMUERAS GENERADAS EN LAS PLANTAS DE OSMOSIS INVERSA.**

Natalia Duran Osorio  
Copiapó, 2025

UNIVERSIDAD DE ATACAMA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

**RECUPERACIÓN DE IONES METÁLICOS VALIOSOS CONTENIDOS EN LAS  
SALMUERAS GENERADAS EN LAS PLANTAS DE OSMOSIS INVERSA.**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
título de Ingeniería Civil en Metalurgia

Profesor Guía: Dr. Mario Santander M  
Comisión: Dr. Luis Valderrama C.  
Dr. Osvaldo Pávez M.

**Natalia Duran Osorio**

**Copiapó, Chile 2025**

## RESUMEN

En esta investigación se evaluó la recuperación de iones metálicos valiosos, como litio (Li) y estroncio (Sr), presentes en las salmueras generadas por plantas de ósmosis inversa, a través de técnicas como precipitación química, adsorción.

La caracterización inicial de la salmuera evidenció una concentración en (mg/L) de sodio (21705), magnesio (2473,5), calcio (774,5), potasio (758) y niveles bajos de litio (3,8) y estroncio (15,4), confirmando su potencial como fuente de recursos metálicos estratégicos. Se realizaron estudios de precipitación utilizando reactivos como cal, carbonato de sodio y cloruro de aluminio, logrando eficiencias de recuperación superiores al 99.97 % para el litio y al 76.62 % para el estroncio en condiciones óptimas.

Los ensayos de adsorción demostraron que con las resinas de intercambio iónico es posible extraer sobre un 80 %, mientras que el carbón activado mostró resultados más variables, especialmente en soluciones con alta concentración de sodio y magnesio. Sin embargo, los resultados de la caracterización física y química realizada no permiten demostrar que los precipitados formados contienen únicamente cloruro o carbonato de estroncio, ni si los iones adsorbidos o intercambiados con el carbón activado o las resinas de intercambio iónico corresponden exclusivamente a estroncio y litio. Esta limitación sugiere la necesidad de análisis adicionales para confirmar la composición de los productos obtenidos.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de aplicar estas metodologías para la recuperación de litio y estroncio, especialmente en matrices complejas como las salmueras de ósmosis inversa. Este trabajo contribuye al desarrollo de estrategias sostenibles para la valorización de recursos metálicos y abre nuevas oportunidades para reducir los impactos ambientales asociados con la gestión de salmueras industriales.

## ABSTRACT

This research evaluated the recovery of valuable metal ions, such as lithium (Li) and strontium (Sr), present in brines generated by reverse osmosis plants. Through techniques such as chemical precipitation and adsorption.

The initial characterization of the brine showed a concentration (mg/l) of sodium (21705), magnesium (2473.5), calcium (774.5), potassium (758) and low levels of lithium (3.8) and strontium (15.4), confirming its potential as a source of strategic metallic resources. Precipitation studies were carried out using reagents such as lime, sodium carbonate and aluminum chloride, achieving recovery efficiencies above 99.97 % for lithium and 76.62 % for strontium under optimum conditions.

The adsorption tests showed that with ion exchange resins it is possible to extract about 80 %, while the activated carbon showed more variable results, especially in solutions with high sodium and magnesium concentrations. However, the results of the physical and chemical characterization performed do not allow demonstrating that the precipitates formed contain only strontium chloride or strontium carbonate, nor whether the ions adsorbed or exchanged with activated carbon or ion exchange resins correspond exclusively to strontium and lithium. This limitation suggests the need for further analysis to confirm the composition of the products obtained.

The results obtained demonstrate the feasibility of applying these methodologies for the recovery of lithium and strontium, especially in complex matrices such as reverse osmosis brines. This work contributes to the development of sustainable strategies for the valorization of metallic resources and opens new opportunities to reduce the environmental impacts associated

with the management of industrial brines.

# ÍNDICE

## Contenido

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Planteamiento del problema.....</i>	1
1.2	<i>Solución Propuesta.....</i>	2
1.3	<i>Hipótesis.....</i>	2
1.4	<i>Objetivos.....</i>	3
1.4.1	General.....	3
1.4.2	Específicos.....	3
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
2.1	<i>Desalinización de agua de mar.....</i>	4
2.1.1	Planta de osmosis inversa.....	4
2.2	<i>Salmueras de rechazo y sus beneficios.....</i>	5
2.2.1	Metales Lónicos a Recuperar y su Relevancia.....	7
2.3	<i>Técnicas de recuperación de metales a partir de salmueras.....</i>	8
2.3.1	Evaporación.....	8
2.3.2	Precipitación Química.....	10
2.3.3	Adsorción.....	12
2.3.4	Extracción por solvente.....	15
2.4	<i>Técnicas de Caracterización.....</i>	17
2.4.1	pH.....	17
2.4.2	Conductividad.....	17
2.4.3	Densidad.....	18
2.4.4	Turbidez.....	18
2.4.5	Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).....	18
2.4.6	Espectrometría de Absorción Atómica (AAS).....	19
2.4.6	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	20
2.4.7	Difracción de rayos x.....	21
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>22</b>
3.1	<i>Materiales y Equipos.....</i>	23
3.2	<i>Metodologías.....</i>	24
3.2.1	Colecta de muestra.....	24
3.2.2	Caracterización química general de la salmuera de rechazo.....	24
3.2.3	Caracterización química específica.....	25
3.2.3	Caracterización de fases sólidas.....	26
3.3	<i>Estudios de precipitación.....</i>	27
3.3.1	Ensayos para precipitar selectivamente los iones Mg, Na, K y Ca.....	27
3.3.2	Ensayos para precipitar los iones Sr y Li.....	29
3.4	<i>Estudio de Adsorción.....</i>	30
3.4.1	Carbón Activado.....	30
3.4.2	Resinas de intercambio iónico.....	31

3.5. Evaluación de la recuperación de estroncio y litio. ....	32
<b>4 CAPITULO IV Resultados y Discusiones .....</b>	<b>32</b>
4.1 Caracterización química de la salmuera de rechazo. ....	33
4.2 Caracterización química específica. ....	34
4.3 Estudios de precipitación.....	35
4.4 Ensayos para precipitar iones Sr y Li. ....	49
4.4.1 Carbonato de sodio.....	49
4.4.2. Cloruro de aluminio hexahidratado.....	55
4.5 Ensayos de adsorción. ....	59
4.5.1. Carbón activado. ....	59
4.2.5. Resina de intercambio iónico 1 (Lewatit Mono Plus TP-214). ....	67
4.2.6. Resina de intercambio iónico 2 (base aluminio).....	71
<b>5 CAPITULO V CONCLUSIONES. ....</b>	<b>75</b>
<b>6 Bibliografía.....</b>	<b>77</b>
<b>7 CAPITULO VII ANEXO.....</b>	<b>86</b>
7.1. Anexo B: Tablas de pH.....	86

## INDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1. Diagrama de proceso de planta de osmosis inversa. ....	5
Figura 2.2. Diagrama de flujo evaporación y cristalización. ....	10
Figura 2.3. Diagrama esquemático de extracción por solvente a nivel de laboratorio. ....	16
Figura 2.5. ICPOES Óptima 8000, Perkin Elmer. ....	19
Figura 2.6. Espectrómetro de Absorción Atómica PinAAcle 900F, Perkin Elmer. ....	20
Figura 2.7. Microscopia electrónica de barrido (SEM). ....	21
Figura 2.8. Difractómetro de rayos x. ....	22
Figura 3.4. Proceso de evaporación ....	28
Figura 4.1. Gráfico de elementos y concentración de elementos (mg/L) en salmuera evaporada 80%. .	37
Figura 4.2. Gráfico de elementos y concentración de elementos (mg/L) en salmuera evaporada 90%. .	38
Figura 4.3. Difractograma rayos x precipitados de salmuera evaporada 90%. ....	41
Figura 4.4. Difractograma rayos x precipitados de salmuera evaporada 80%. ....	42
Figura 4.5. Gráfico de elementos y concentración de elementos (mg/L) en salmuera con cal añadido pH 12. ....	44
Figura 4.6. Gráfico de elementos y concentración de elementos (mg/L) en salmuera con cal añadido pH 12. ....	44
Figura 4.7. Mapa Elemental y Espectro EDS de Sólidos Precipitados a pH 12. ....	46
Figura 4.8. Difractograma de rayos x a pH 12. ....	48
Figura 4.9. Gráfico de % de Li precipitado respecto a la cantidad añadida de carbonato de sodio salmuera de rechazo. ....	51
Figura 4.10. Gráfico de % de Li precipitado respecto a la cantidad añadida de carbonato de sodio SrCl <sub>2</sub> +LiCl. ....	51
Figura 4.11. Gráfico de % de Li precipitado respecto a la cantidad añadida de carbonato de sodio Salmuera evaporada. ....	52
Figura 4.12. Porcentaje de estroncio (Sr) recuperado en función de la cantidad de carbonato de sodio añadido en SrCl <sub>2</sub> + LiCl. ....	53
Figura 4.13. Porcentaje de estroncio (Sr) recuperado en función de la cantidad de carbonato de sodio añadido en Salmuera. ....	54
Figura 4.14. Gráfico de % litio precipitado respecto a la cantidad añadida de carbonato de sodio para la solución de LiCl. ....	55

<b>Figura 4.15. Grafico % recuperación de litio respecto a la cantidad añadida de cloruro de Aluminio por AAS en salmuera de rechazo.</b> .....	<b>56</b>
<b>Figura 4.16 Grafico % recuperación de litio respecto a la cantidad añadida de cloruro de Aluminio por AAS en SrCl<sub>2</sub>+LiCl.</b> .....	<b>57</b>
<b>Figura 4.17. Grafico % recuperación de estroncio respecto a la cantidad añadida de cloruro de aluminio por ICP_OES salmuera de rechazo.</b> .....	<b>58</b>
<b>Figura 4.18. Grafico % recuperación de estroncio respecto a la cantidad añadida de cloruro de aluminio por ICP_OES en SrCl<sub>2</sub>+LiCl.</b> .....	<b>59</b>
<b>Figura 4.19. Gráfico de porcentaje de litio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado. Resultados obtenidos por AAS en salmuera de rechazo.</b> .....	<b>61</b>
<b>Figura 4.20. Gráfico de porcentaje de litio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado. Resultados obtenidos por AAS en LiCl.</b> .....	<b>61</b>
<b>Figura 4.21. Gráfico de porcentaje de litio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado. Resultados obtenidos por AAS en SrCl<sub>2</sub>+LiCl.</b> .....	<b>62</b>
<b>Figura 4.22. Gráfico de porcentaje de litio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado para la solución de LiCl por AAS.</b> .....	<b>63</b>
<b>Figura 4.23. Gráfico de porcentaje de estroncio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado en salmuera de rechazo.</b> .....	<b>65</b>
<b>Figura 4.24. Grafico de porcentaje de estroncio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado en salmuera de rechazo en SrCl<sub>2</sub>.</b> .....	<b>66</b>
<b>Figura 4.25. Gráfico de porcentaje de estroncio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado en salmuera de rechazo en SrCl<sub>2</sub> +LiCl.</b> .....	<b>66</b>
<b>Figura 4.26. Gráfico de porcentaje de litio recuperado mediante la cantidad añadida de resina 1 en la salmuera mediante AAS.</b> .....	<b>68</b>
<b>Figura 4.27. Gráfico de porcentaje de estroncio recuperado mediante la cantidad añadida de resina 1 mediante ICP-OES en salmuera de rechazo.</b> .....	<b>70</b>
<b>Figura 4.28. Gráfico de porcentaje de estroncio recuperado mediante la cantidad añadida de resina 1 mediante ICP-OES en SrCl<sub>2</sub>+liCl.</b> .....	<b>70</b>
<b>Figura 4.29. Gráfico de porcentaje recuperación de Li respecto a la cantidad añadida de resina 2 por AAS.</b> .....	<b>72</b>
<b>Figura 4.30. Gráfico de porcentaje recuperación de Li respecto a la cantidad añadida de resina 2 por AAS en LiCl.</b> .....	<b>72</b>
<b>Figura 4.31. Gráfico de porcentaje recuperación de Sr respecto a la cantidad añadida de resina 2 en salmuera de rechazo.</b> .....	<b>74</b>

## INDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 2.1. Concentración típica de una salmuera generada en una planta de osmosis inversa (Floor, 2006).....</b>	<b>6</b>
<b>Tabla 4.1. Parámetros fisicoquímicos salmuera inicial. ....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 4.2. Elementos presentes en salmuera inicial. ....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 4.3. Elementos presentes en salmuera residual (León Duharte et al., 2006).....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 4.4. Elementos incrementados en la salmuera evaporada a diferentes volúmenes. ....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 4.5. Condiciones fisicoquímicas salmueras evaporadas 80% y 90%.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 4.6. Concentración de elementos en solución pH 10. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 4.7. Concentración de elementos en solución pH 12. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 4.8. Concentraciones iniciales de litio y estroncio (mg/L). ....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 4.9. Porcentaje de recuperación de Li en función de la concentración Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (M).....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 4.10. Porcentaje de recuperación de Sr en función de concentración Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (M).....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 4.11. Porcentaje de Li recuperado en comparación con el Cloruro de aluminio añadido a cada solución mediante AAS. ....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 4.12. Porcentaje de Sr recuperado en comparación con el Cloruro de aluminio añadido a cada solución mediante método de ICP-OES.....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 4.13. Porcentaje recuperación de litio en comparación de la cantidad añadida de carbón activado analizado por AAS. ....</b>	<b>60</b>
<b>Tabla 4.14 Porcentaje recuperación de litio en comparación a la cantidad de carbón activado para la solución de LiCl. ....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 4.15. Porcentaje recuperación de estroncio en comparación de la cantidad añadida de carbón activado por ICP-OES. ....</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 4.16. Recuperación de Li en la salmuera mediante la cantidad añadida de resina.....</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 4.17. Recuperación de Sr mediante la cantidad añadida de resina. ....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 4.18. Recuperación de litio mediante la cantidad añadida de resina 2.....</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 4.19. Recuperación de estroncio mediante la cantidad añadida de resina 2.....</b>	<b>73</b>

# 1 CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamiento del problema

La desalinización del agua de mar experimenta un crecimiento constante en la región norte del país, impulsado principalmente por el sector minero (S/A, 2023). Este proceso se lleva a cabo mediante la desalinización térmica o de osmosis. En este trabajo de titulación, el enfoque se centra en el rechazo de la desalinización realizada a través del proceso de osmosis inversa. En este método, se emplea un sistema de filtración donde se somete el agua salada a presión, pasando por una membrana que retiene selectivamente los contaminantes, como sales, minerales e impurezas y entregando así un agua purificada.

Actualmente en Chile hay 24 plantas desalinizadoras en operación (portal minero) (ACADES), produciendo 8000 L/s aproximadamente, de las cuales 3 se encuentran en la costa de la Región de Atacama. De la fecha al año 2033 se espera que el agua del mar represente el 71% del abastecimiento de agua para suplir las demandas por parte de las empresas mineras (COCHILCO). Sin embargo, uno de los problemas que afecta la sostenibilidad de este proceso es la generación de salmueras las cuales se caracterizan por tener una alta salinidad, temperaturas, sólidos disueltos totales y metales. Además, estas salmueras contienen pH alterados y productos químicos de pretratamientos, los que afectan de manera negativa al ecosistema marino al ser desechadas al océano, alterando el flujo, la proliferación y supervivencia de ciertas especies. Esto conduce a la necesidad de desarrollar una estrategia de gestión de la salmuera con el fin de prevenir posibles consecuencias ambientales y para la salud (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2023).

La salmuera de rechazo de agua de mar contiene sales y iones metales que son de interés para su recuperación por su aplicación en la industria aeroespacial, farmacéutica, construcción, entre otros, lo que disminuiría la eliminación de desechos con un beneficio económico (Kumar et al., 2021). La salmuera posee una concentración de sales e iones significativamente mayor que la del agua de mar, alcanzando niveles considerables de

alrededor de 70 000 mg/L, en comparación con los 33 000 a 37 000 mg/L presentes en el agua de mar (Loganathan et al., 2017, Kaplan et al., 2017).

Con los antecedentes mencionados, se torna interesante extraer los iones Na, Ca, Mg, K, Br, Sr, B, Li y Rb, de la salmuera rechazada de las plantas de osmosis inversa. Estos son factibles de recuperar debido a su valor económico y concentración significativa en la salmuera, produciendo ventajas económicas y un impacto positivo al medio ambiente.

## **1.2 Solución Propuesta**

Estudiar la factibilidad de recuperar Sr y Li, de la salmuera rechazada de las plantas de osmosis inversa aplicando técnica de precipitación química, adsorción y/o intercambio iónico.

## **1.3 Hipótesis**

- a) Es viable precipitar selectivamente los iones de sodio, calcio, magnesio, potasio y bromo presentes en salmueras de rechazo mediante procesos de evaporación y/o precipitación química, con el objetivo de enriquecer la solución en iones de estroncio y litio.
  
- b) Es posible recuperar estroncio y litio de la salmuera mediante precipitación con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  o  $\text{AlCl}_3$ .
  
- c) Es factible recuperar estroncio y litio de la salmuera mediante adsorción en carbón activado o resina de intercambio iónico.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 General**

El objetivo general de este trabajo de titulación es analizar la factibilidad de recuperar los iones de estroncio (Sr) y litio (Li) presentes en las salmueras de rechazo generadas por una planta de ósmosis inversa ubicada en la Región de Atacama.

### **1.4.2 Específicos**

- a. Realizar la caracterización química general y específica de una muestra representativa de salmuera de rechazo de una planta de ósmosis inversa.
- b. Evaluar la factibilidad de precipitar selectivamente los iones de sodio, calcio, magnesio, potasio y bromo presentes en salmueras de rechazo mediante procesos de evaporación y/o precipitación con hidróxido de calcio, con el objetivo de enriquecer la solución en iones de estroncio y litio.
- c. Efectuar ensayos con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{AlCl}_3$  para precipitar estroncio y litio desde salmuera, salmuera evaporada y soluciones sintéticas que contengan iones de estroncio y/o litio.
- d. Ejecutar ensayos de adsorción e intercambio iónico para recuperar estroncio y litio desde salmuera, salmuera evaporada y desde soluciones sintéticas que contengan iones de estroncio y/o litio.

## **2 CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

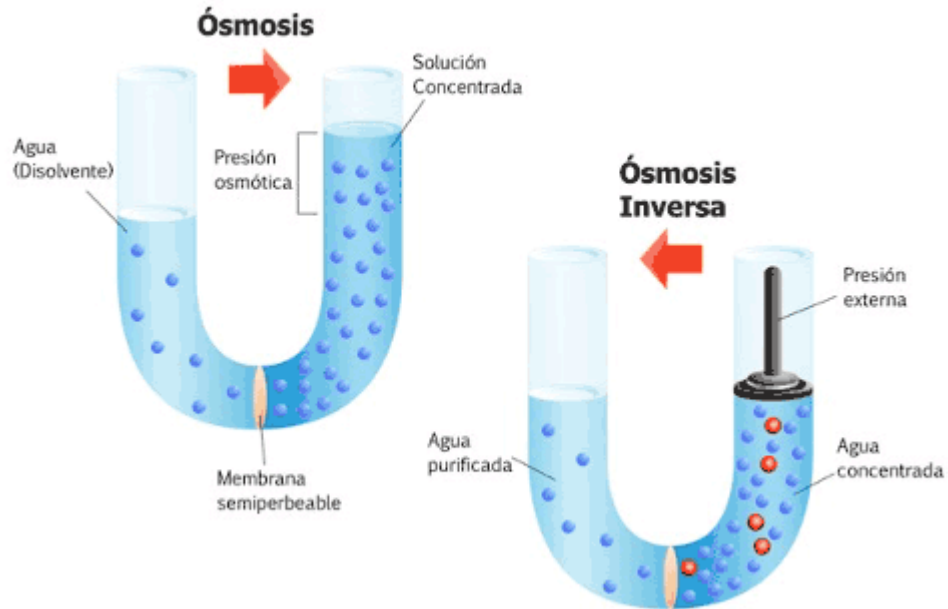
### **2.1 Desalinización de agua de mar**

La desalinización de agua de mar es un proceso técnico que implica la eliminación selectiva de sales y otros solutos disueltos del agua de mar para obtener un agua dulce, libre de impurezas. Para esto, es necesario reducir la concentración de sales en el agua desde 35 g/L a un nivel inferior a 0,5 g/L, el cual está establecido como el umbral de potabilidad aceptado (Ñancuan, Novoa, & Schnell, 2022). Los métodos de desalinización de agua de mar se dividen en dos categorías principales: evaporación térmica como las técnicas de destilación instantánea en múltiples etapas, destilación multi efectos y compresión del vapor, la segunda categoría es la separación basada en membrana como la desalinización de membrana, ósmosis inversa, electrodiálisis (Baeza & Harris).

#### **2.1.1 Planta de osmosis inversa**

Es un sistema de tratamiento de agua basado en un proceso de separación por membrana. En este proceso se aplica una presión hidráulica a través de una membrana semipermeable con poros microscópicos, que actúa como una barrera para las partículas, iones y moléculas presentes en el agua. Se le aplica presión, el agua es forzada a atravesar la membrana, mientras que las impurezas y los iones no deseados son retenidos y eliminados, este desecho es conocido como salmuera o rechazo (Ahumada & Andrés, )

Figura 2.1. Diagrama de proceso de planta de osmosis inversa.



## 2.2 Salmueras de rechazo y sus beneficios

Las salmueras de rechazo albergan una abundancia de iones metálicos de gran valor, lo que conlleva múltiples beneficios (Lundaev et al., 2022). Uno de estos beneficios radica en la reducción de los costos de producción de la desalinización, ya que permite generar ingresos adicionales mediante su recuperación. Esto, a su vez, contribuye a minimizar el impacto ambiental y recupera estos componentes en lugar de eliminarlos directamente de la salmuera al mar (Loganathan et al., 2017, Park et al., 2022). La explotación de la salmuera de agua de mar se vuelve cada vez más factible en términos económicos y medioambientales.

Los elementos como cloruro sódico, cloruro potásico, magnesio, calcio, bromo, estroncio, bario, cesio, rubidio, germanio, fósforo, molibdeno, cesio, galio, vanadio, boro, escandio y litio se podrían extraer de esta fuente líquida, que es la salmuera producida por el proceso de desalación. En particular, la extracción de minerales como magnesio, sodio, calcio, potasio, estroncio, litio, bromo, boro y rubidio podría resultar sumamente atractiva por sus

concentraciones en la salmuera como también desde una perspectiva económica (Minería de Salmuera: La Recuperación de Minerales en la Desalación de Agua, 2022).

En la tabla 1 podremos observar la concentración que tienen en general la salmuera de agua de mar tratada por osmosis inversa.

Tabla 2.1. Concentración típica de una salmuera generada en una planta de osmosis inversa (Floor, 2006).

Ion	Concentración (mg/L)
Na	22100-17521
Mg	2450-2867
Ca	669-960
K	554-783
Br	8-120
Sr	14,5-15,4
B	4,45
Li	0,27-0,4
Rb	0,194-0,2
Ni	0,01
U	0,0039
Cs	0,0008
Ge	0,0006

### 2.2.1 Metales Iónicos a Recuperar y su Relevancia

Los metales y elementos mencionados poseen una amplia gama de aplicaciones en la industria, y a continuación, se presentarán algunos de ellos junto con sus respectivos usos destacados:

- **Magnesio (Mg):** Se utiliza en la fabricación de aleaciones de aluminio, encontrando aplicación en la industria aeroespacial y en la construcción, especialmente en la producción de cemento refractario, entre otros usos significativos (Magnesio: Propiedades, Usos, Características y Ejemplos).
- **Calcio (Ca):** En el ámbito de la metalurgia, el calcio se utiliza para la desulfuración del acero, contribuyendo a mejorar sus propiedades (Rodríguez & Velasco Hurtado).
- **Estroncio (Sr):** El estroncio encuentra aplicaciones en la industria farmacéutica, así como en la fabricación de vidrio y cerámica, donde sus propiedades particulares son valiosas para obtener resultados específicos (Resumen de salud pública: estroncio (strontium), 2021).
- **Boro (B):** En el ámbito de la metalurgia, el boro se emplea para la producción de aleaciones especiales. En la industria del vidrio, se utiliza para mejorar la resistencia y durabilidad de los productos (Boro, 2019).
- **Litio (Li):** Se utiliza en la fabricación de baterías de iones de litio, que son fundamentales en la electrónica moderna. Además, el litio tiene aplicaciones en la industria farmacéutica, en la síntesis de polímeros avanzados y tecnología termosolar (Claves del litio: el metal más liviano y con mayor potencial electroquímico, 2022)(Tecnologías de litio para la industria farmacéutica, 2018).
- **Rubidio (Rb):** Entre sus aplicaciones se encuentran la fabricación de celdas solares y dispositivos electrónicos avanzados (“Rubidio,” 2020).

- Níquel (Ni): Ampliamente empleado en la producción de acero inoxidable y en aleaciones que ofrecen resistencia a la corrosión en diversos entornos Industriales (Propiedades del Níquel y sus Aleaciones).
- Uranio (U): Su aplicación principal radica en la industria nuclear, donde se utiliza como combustible en reactores para la generación de energía Uranio (Uranium), 2021).

Estos ejemplos ilustran la diversidad de aplicaciones industriales y científicas para los metales mencionados, lo que los convierte en elementos de gran interés económico y tecnológico debido a sus propiedades y contribuciones específicas en cada campo.

## **2.3 Técnicas de recuperación de metales a partir de salmueras.**

### **2.3.1 Evaporación.**

La evaporación es un proceso térmico que consiste en la eliminación controlada de agua o solventes volátiles de una solución, mediante la aplicación de calor, para concentrar los solutos presentes. Este proceso es fundamental en la recuperación de metales y minerales a partir de salmueras, ya que permite aumentar la concentración de compuestos de interés, facilitando su posterior extracción y purificación (Trujillo, 2023).

En términos prácticos, la evaporación puede realizarse mediante energía solar, calor inducido o sistemas híbridos, dependiendo de la disponibilidad de recursos y las características de la salmuera. Los métodos más utilizados son:

**Evaporación solar:** Uso de luz solar directa para la concentración de sales, común en regiones áridas y semiáridas.

**Evaporación por calor inducido:** Empleo de sistemas térmicos, como cristalizadores y destiladores de membrana, para procesos más rápidos y controlados.

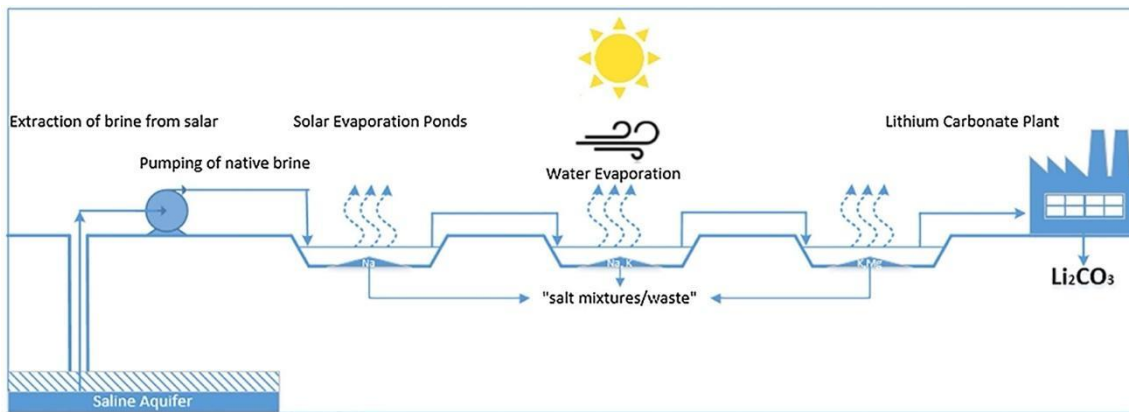
La evaporación, como técnica para la recuperación de metales y minerales, depende de un control preciso de las variables operacionales, las cuales impactan directamente en su eficiencia y en las aplicaciones metalúrgicas. Según Trujillo (2023), la temperatura es fundamental, ya que su aumento acelera la velocidad de evaporación, facilitando la sobresaturación y la posterior cristalización de los solutos. Este control es particularmente relevante en procesos de calor inducido, donde mantener la temperatura en rangos específicos evita problemas como la formación de incrustaciones. Por otro lado, la presión juega un rol importante, ya que una presión reducida permite que la evaporación ocurra a temperaturas más bajas, reduciendo los costos energéticos (Choi et al., 2020).

Flexer (2018) resalta que la concentración inicial de la salmuera es clave para determinar el tiempo necesario para alcanzar la sobresaturación. Salmueras con mayores concentraciones de solutos pueden acortar el tiempo del proceso, mientras que las más diluidas requieren periodos prolongados. Adicionalmente, la velocidad de flujo del aire o vapor, mencionada por Choi et al. (2020), facilita la transferencia de masa y la eliminación del agua evaporada, mejorando la eficiencia del sistema. Por último, Trujillo (2023) subraya la importancia de la superficie de contacto, especialmente en la evaporación solar, donde una mayor área permite captar más energía solar, optimizando el proceso en regiones áridas.

En cuanto a las aplicaciones metalúrgicas, Flexer (2018) detalla que la evaporación solar es ampliamente utilizada para la recuperación de litio, aumentando su concentración en salmueras naturales hasta niveles óptimos (6000 ppm). Posteriormente, el litio se recupera como carbonato de litio mediante carbonatación con carbonato de sodio, un proceso esencial en regiones como el "Triángulo del Litio" (Argentina, Chile y Bolivia)

La Figura 2.2 muestra un diagrama de flujo del proceso de evaporación y cristalización para obtener carbonato de litio a partir de salmueras. La salmuera es evaporada en piscinas solares durante 13 meses, alcanzando 6000 ppm de litio, tras lo cual se añade carbonato de sodio para precipitar el carbonato de litio. El proceso incluye tratamientos químicos para eliminar impurezas, como boratos y magnesio, asegurando la pureza del producto final. (Flexer, 2018).

Figura 2.2. Diagrama de flujo evaporación y cristalización.



Por su parte, Choi et al. (2020) reportan que los sistemas de calor inducido, como el cristizador de destilación de membrana fraccionada (F-SMDC), son efectivos para recuperar sulfato de sodio, logrando una recuperación del 72% de agua y generando cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , lo que destaca su aplicabilidad para la valorización de salmueras en procesos industriales.

(Zhang et al., 2021) menciona que la cristalización por evaporación solar emerge como un método especialmente prometedor desde una perspectiva económica y medioambiental. Este enfoque aprovecha la energía solar para la extracción de litio, sin la necesidad de introducir reactivos adicionales, y logra una pureza excepcional del 99.6%, esta técnica es usada para la extracción del litio.

### 2.3.2 Precipitación Química.

Los métodos de precipitación en salmueras representan un proceso químico fundamental que involucra la generación y posterior separación de sólidos insolubles a partir de los iones disueltos en la salmuera. La formación de estos precipitados se logra a través de reacciones

químicas controladas entre reactivos específicos y los iones presentes en la salmuera, lo que conduce a la creación de compuestos sólidos con una baja solubilidad. Luego, estos sólidos se someten a un proceso de separación del líquido, lo que posibilita la recuperación y purificación de los metales u otros componentes de interés (Operaciones Básicas en Laboratorio de Química. Precipitación. Fundamento de la Técnica).

### **2.3.2.1 Modificación pH.**

En el ámbito de la ingeniería metalúrgica y la química, se emplea un método conocido por su capacidad de fomentar la formación de sólidos precipitados en soluciones mediante la alteración controlada de su nivel de acidez o alcalinidad, lo que se conoce como el pH. Este procedimiento implica la introducción de agentes precipitantes que provocan un cambio en el pH de la solución, reduciendo, en consecuencia, la solubilidad de ciertos iones o compuestos contenidos en dicha solución y desencadenando la precipitación de dichos componentes en estado sólido (Pastrana, 2022).

La elección del agente precipitante y las condiciones de pH apropiadas dependen tanto de la composición de la solución como de los objetivos específicos del proceso. Algunos de los agentes precipitantes empleados para ajustar el pH incluyen  $NaOH$ ,  $NH_4OH$ ,  $Na_3PO_4$  y  $Ca(OH)_2$ , y los sólidos insolubles formados pueden recuperarse mediante técnicas de flotación o filtración (Fontana et al., 2022).

### **2.3.2.2 Carbonato de sodio.**

El artículo (Zhang et al., 2019) aborda la extracción de litio a partir de salmueras ricas en cloruro de litio ( $LiCl$ ) utilizando carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ). Este método se basa en un proceso secuencial de evaporación y cristalización, donde las impurezas principales (sodio y potasio) se eliminan antes de la etapa de precipitación. La adición de carbonato de sodio a las salmueras permite la formación de carbonato de litio ( $Li_2CO_3$ ) con una pureza de hasta el 99.6%. La investigación concluyó que el uso de carbonato de sodio es una estrategia viable para la recuperación de litio, especialmente en salmueras con bajas concentraciones de magnesio. Este método es ampliamente aplicado en la industria debido a su bajo costo, facilidad de implementación y contribución a la sostenibilidad ambiental

### **2.3.2.3 Cloruro de aluminio.**

Se han realizado estudios que validan la efectividad de la técnica de precipitación de aluminato, la cual se utiliza para extraer litio de salmueras, para esta técnica la salmuera debe tener una alta proporción en masa de Mg/Li. Se añade sal de aluminio  $AlCl_3 * H_2O$  y  $NaOH$  a la salmuera generando  $Al(OH)_3$  amorfo, que tiene una precipitación selectiva para el litio y desempeña un papel importante en la precipitación del Litio. Proceso (Xiao, 2005, Yang et al., 2013) (Ye Zhang, 2019). Durante el proceso de precipitación, se puede producir un precipitado de aluminato de litio  $LiCl * 2Al(OH)_3 * xH_2O$  controlando parámetros tales como  $Al^{3+}/Li^+$ , pH y temperatura. Esta reacción química cumple con la ecuación dinámica de reacción de primer orden (Yang et Al., 2013) (Ye Zhang, 2019).

La precipitación de aluminato es un método utilizado para extraer litio de las salmueras de lagos salados. Este método implica la reacción entre  $AlCl_3 * H_2O$  y una base fuerte como KOH o NaOH para obtener un precipitado de  $Al(OH)_3$  amorfo. El precipitado de aluminato se puede utilizar para precipitar el litio de la salmuera, lo que permite la recuperación de los recursos de litio y magnesio. La precipitación de aluminato es una técnica prometedora para la extracción de litio de las salmueras de lagos salados debido a su bajo costo, fácil industrialización y alta eficiencia.

### **2.3.3 Adsorción.**

Uno de los desafíos más relevantes se presenta al intentar recuperar iones metálicos que se encuentran en bajas concentraciones en salmueras. Estos iones son particularmente difíciles de recuperar utilizando la técnica de precipitación, dado que posee una alta solubilidad en soluciones acuosas, lo que impide su precipitación de manera eficiente en forma sólida.

La adsorción se convierte en una herramienta esencial en el campo metalúrgico. Es un mecanismo de separación que se basa en la capacidad de ciertos materiales, conocidos con el nombre de adsorbentes, para atraer y retener los iones metálicos de baja concentración en su superficie. Cabe mencionar que la porosidad del adsorbente es un factor crítico en el proceso de adsorción ya que el tamaño, volumen y forma de los poros afectan directamente la eficiencia del proceso. Posteriormente, mediante un proceso de desorción que generalmente es mediante un lavado con una solución específica donde se pueden recuperar los elementos capturados previamente y el adsorbente se puede volver a utilizar (win, 2020).

### **2.3.3.1 Carbón activado.**

Según Torres Fernández (2024), la contaminación del agua con metales pesados como cobre (Cu), cadmio (Cd) y plomo (Pb) puede ser tratada de manera eficaz mediante el método de adsorción con carbón activado. En particular, el uso de carbón activado modificado con ácido nítrico ha demostrado mejorar significativamente su capacidad de adsorción al aumentar la cantidad de grupos funcionales oxigenados en su superficie, como carboxilos e hidroxilos. Estos grupos favorecen la interacción electrostática entre el carbón activado y los cationes metálicos, logrando eficiencias de remoción de hasta el 99.03% para Pb(II), 85.85% para Cu(II) y 49.97% para Cd(II) en soluciones monocomponentes, mientras que en soluciones multicomponentes se observó una mayor selectividad hacia Cu(II). Esto resalta el potencial de esta técnica como una solución efectiva y sostenible para la remoción de metales pesados en agua contaminada.

Además (Fontana, Forte, Pietranronio, Pucciarmati, & Marcoaldi, 2022) llevó a cabo ensayos utilizando diversos adsorbentes como el carbón activado, las zeolitas y resinas de intercambio iónico con el fin de recuperar el magnesio. Típicamente, el proceso implica la adición del adsorbente a la solución de salmuera, donde los iones de magnesio se adhieren de manera selectiva a la superficie del adsorbente. Posteriormente, se procede a la separación del adsorbente de la solución de salmuera, permitiendo así que los iones de magnesio sean extraídos del adsorbente mediante el uso de un disolvente adecuado. Los iones de magnesio obtenidos en el proceso de elución pueden someterse a etapas adicionales de procesamiento

para lograr la obtención de un producto de magnesio de elevada pureza. Este enfoque se ha mostrado prometedor para la recuperación eficiente y selectiva de magnesio de las salmueras, lo que puede contribuir a la obtención de un producto de alta calidad en aplicaciones metalúrgicas y afines.

El artículo de Rojas et al. (2012) analiza el empleo de carbón activado granular (GAC) como adsorbente para la remoción de mercurio en aguas residuales de la minería, utilizando columnas de lecho fijo para simular condiciones reales. Se aplicó el modelo de Bohart y Adams para evaluar las curvas de ruptura y la eficiencia del adsorbente. Los resultados mostraron que el carbón activado, gracias a su alta área superficial y estructura porosa, retuvo eficazmente los iones de mercurio, alcanzando tiempos de ruptura óptimos de 20 minutos. Además, los análisis posteriores revelaron mínimos cambios en la textura del material, sugiriendo su reutilización. El experimento demostró ser exitoso, posicionando al GAC como una solución rentable, eficiente y escalable para tratar efluentes industriales con altos niveles de metales pesados.

### **2.3.3.2 Resinas de intercambio iónico.**

Bonin et al., 2021 investigaron la técnica de intercambio iónico selectivo. Se emplea la resina Amberlite IRA743 en una columna de intercambio iónico, la cual es llenada con la resina y el flujo de la solución de salmuera se controla meticulosamente mediante una bomba de jeringa. Durante la investigación, se exploran diversos parámetros como la velocidad de flujo, la temperatura, el pH y la presencia de otros iones, con el propósito de evaluar la selectividad de la resina en la extracción de boro de las salmueras. Se realizan pruebas en lotes y se generan curvas de ruptura que reflejan la concentración de boro y otros iones en el efluente a medida que la salmuera atraviesa la columna. Los resultados destacan la selectividad de la resina de intercambio iónico Amberlite IRA743 para la extracción de boro de las salmueras, sin que se presente una pérdida significativa de litio. Además, se analiza la capacidad de la salmuera para precipitar hidróxido de magnesio  $Mg(OH)_2$  y se realiza una comparación de la cantidad de litio absorbido en el sólido y la pureza del precipitado entre la salmuera original y la salmuera libre de boro.

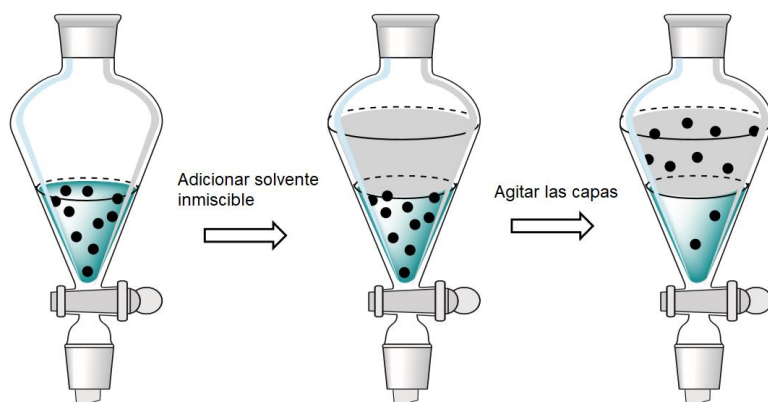
(Kolodynska et Al, 2017) En su investigación, se estudió la técnica de adsorción como método para recuperar el boro de soluciones acuosas. En este proceso, se emplearon resinas de intercambio iónico con grupos funcionales específicos capaces de unirse de manera selectiva al boro presente en la solución. Cuando estas resinas entraron en contacto con una solución que contenía boro, los iones de boro se adhirieron a los grupos funcionales de la resina, lo que resultó en la eliminación efectiva del boro de la solución.

Posteriormente, la resina cargada con boro se sometió a un lavado utilizando una solución adecuada con el propósito de eliminar otros iones no deseados y permitir la recuperación exclusiva del boro. Este enfoque basado en la adsorción se presenta como una alternativa altamente promisorio para la recuperación de boro en salmueras generadas a partir de la desalinización del agua de mar. Este método se destaca por su eficiencia y selectividad en la extracción de boro de soluciones acuosas.

#### **2.3.4. Extracción por solvente**

La extracción por solvente, conocida también como extracción líquido-líquido o SX, es una técnica de separación selectiva ampliamente utilizada. En la primera etapa se pone en contacto la solución con la fase orgánica inmiscible cargada con moléculas orgánicas las cuales son llamadas extractantes. Los extractantes tienen afinidad por ciertos iones o compuestos por lo que interactúan entre ellos y así logran capturar los iones de interés de la solución, lo que permite separarlos de manera efectiva. La fase orgánica y la solución al ser inmiscibles, no logran mezclarse completamente lo que facilita su separación. En la etapa posterior de lavado se liberan los iones de la fase orgánica para su recuperación o procesamiento adicional.

Figura 2.3. Diagrama esquemático de extracción por solvente a nivel de laboratorio.



(Xie et al., 2023) demostró la aplicabilidad de esta técnica en la extracción de cesio (Cs) y rubidio (Rb) a partir de una solución acuosa que inicialmente contenía potasio (K) y sodio (Na). Se emplearon sulfonato de queroseno y t-BAMBO como fases orgánicas, mientras que se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) como fase acuosa. En la etapa subsiguiente de extracción y purificación, se logró una separación exitosa del cesio y rubidio con una eficiencia del 99.8% y 98.09%, respectivamente. Sin embargo, se co-extrajo un 19.31% de potasio en la fase orgánica durante este proceso.

Finalmente, se logró la recuperación del cesio y el rubidio mediante una etapa de stripping, utilizando una solución de ácido clorhídrico (HCl).

(Li et al., 2023) estudiaron el ámbito de la extracción de litio por solvente, mencionando una variedad de extractantes que pueden desempeñar un papel crucial en este proceso. Estos extractantes incluyen  $\beta$ -dicetonas, éteres corona, organofosfinas y líquidos iónicos. Sin embargo, se destaca que las organofosfinas sobresalen como una opción especialmente promisorio en términos de aplicaciones prácticas debido a su notable estabilidad y efectividad en la extracción de iones de litio.

Las organofosfinas utilizadas en este contexto pueden clasificarse en dos categorías principales: ácidas y neutras. En la primera categoría, se encuentran ejemplos como Cyanex 272, Cyanex 301, Cyanex 923, D2EHPA y MEHPA, mientras que en la categoría de extractantes de organofosfinas neutros, figuran TBP, TOP, TIBP, DEEP y DBBP. Estos

compuestos presentan diversas ventajas que hacen que sean idóneos para la extracción de litio, lo que los convierte en herramientas valiosas para esta aplicación en la industria metalúrgica y otros campos afines.

Además (Soto et al., 1984) describe un estudio sobre la extracción de calcio y estroncio de soluciones acuosas utilizando diferentes solventes y reactivos. Se utilizó 1-fenil-3-metil-5-pirazolona como reactivo y se estudió la extracción de los metales utilizando diferentes solventes y derivados de 4-acilo. A su vez se menciona que se utilizaron los solventes MIBK (metil isobutil cetona) y alcohol bencílico para la extracción de calcio y estroncio. Los resultados mostraron que la extracción de calcio es más fácil que la de estroncio y que la longitud de la cadena acilo en los derivados afecta la extracción de estroncio.

## **2.4. Técnicas de Caracterización.**

### **2.4.1. pH.**

El pH es una medida que indica la acidez o alcalinidad de una sustancia, definida como la concentración de iones hidrógeno presentes en el agua. Se expresa en una escala logarítmica de 0 a 14, donde un valor menor a 7 indica acidez, un valor de 7 indica neutralidad y un valor mayor a 7 indica alcalinidad. Su importancia radica en que regula muchas reacciones químicas y biológicas, afectando la solubilidad, toxicidad y disponibilidad de sustancias químicas en un sistema. El pH es fundamental para controlar procesos de precipitación, adsorción y remoción de contaminantes (Folleto Informativo 3.1.4.0. *pH*).

### **2.4.2. Conductividad.**

La conductividad eléctrica es la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, la cual depende de la cantidad y tipo de iones disueltos, como sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Está relacionada estrechamente con la salinidad, que mide la cantidad total de sales disueltas en el agua. La conductividad se mide en unidades de microsiemens

por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y es inversa a la resistencia eléctrica del agua (Folleto Informativo 3.1.3.0. (n.d.). *Conductividad eléctrica/salinidad*).

### **2.4.3. Densidad.**

La densidad es una propiedad intensiva de la materia que se define como la relación entre la masa de un objeto y su volumen. Se expresa matemáticamente como:

$$\rho = m/V$$

donde  $m$  es la masa y  $V$  el volumen. Su unidad en el Sistema Internacional es el kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), aunque también se usa el gramo por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en laboratorios y química (Callister & Rethwisch, 2018).

Uno de los métodos para medir la densidad es el método del picnómetro. El picnómetro es un instrumento de laboratorio, generalmente fabricado en vidrio, diseñado para medir con precisión la densidad de líquidos y sólidos. Consiste en un pequeño frasco de cuello estrecho, cerrado con un tapón esmerilado que termina en un tubo capilar, permitiendo determinar volúmenes con gran exactitud (Ecu Red).

### **2.4.4. Turbidez.**

La turbidez se refiere a la presencia de partículas en suspensión en el agua, afectando directamente su claridad. A mayor cantidad de sólidos en suspensión, el agua se torna más turbia o menos transparente, lo que incrementa el valor de NTU. La NTU, sigla de Nephelometric Turbidity Unit (Unidad Nefelométrica de Turbidez), es la unidad empleada para cuantificar la turbidez en un fluido. (Tecno Converting, 2024).

La relación entre NTU y los sólidos en suspensión no es lineal ni universalmente constante, ya que depende de diversos factores como el tipo de partículas presentes en el agua, su tamaño, forma y refracción de la luz (TecnoConverting, 2024).

### **2.4.5. Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).**

La Espectroscopia de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) es una técnica analítica avanzada utilizada para determinar concentraciones de elementos en diversas muestras, especialmente en matrices complejas como minerales, aguas industriales, y materiales biológicos. Su versatilidad y precisión la convierten en una herramienta esencial en campos como la metalurgia, medio ambiente, química, alimentos y medicina (Jiménez Heinert, Grijalva Endara, & Ponce Solórzano, 2020).

El ICP-OES utiliza un plasma de argón, generado a altas temperaturas (~6800 K), para ionizar los átomos presentes en la muestra. Los átomos excitados emiten luz en longitudes de onda específicas, que son detectadas por un espectrómetro. La intensidad de esta luz se correlaciona con la concentración del elemento, permitiendo su cuantificación con alta precisión (Jiménez Heinert, Grijalva Endara, & Ponce Solórzano, 2020).

Figura 2.5. ICPOES Óptima 8000, Perkin Elmer.



#### **2.4.6. Espectrometría de Absorción Atómica (AAS)**

La Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS) es una técnica analítica precisa y ampliamente utilizada para determinar la concentración de elementos específicos en una muestra. Su principio se basa en la absorción de luz por átomos en fase gaseosa, lo que permite cuantificar elementos traza y ultra traza en diversas matrices (*Espectroscopia de Absorción Atómica*).

La muestra líquida se introduce en un sistema de atomización, donde se transforma en un aerosol. Posteriormente, el aerosol es llevado a una llama o un horno de grafito que genera átomos gaseosos. Los átomos gaseosos interactúan con luz emitida por una lámpara de cátodo hueco, específica para el elemento a analizar. Los átomos absorben luz en longitudes de onda particulares, dependiendo del elemento, realizando una transición a niveles de energía más altos. La cantidad de luz absorbida es directamente proporcional a la concentración del elemento en la muestra, según la ley de Beer-Lambert (*Espectroscopia de Absorción Atómica*).

Figura 2.6. Espectrómetro de Absorción Atómica PinAAcle 900F, Perkin Elmer.



#### **2.4.6 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)**

El Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) es un instrumento avanzado que utiliza un haz de electrones en lugar de luz para generar imágenes de alta resolución y profundidad de campo de la superficie de una muestra. Es decir, un cañón de electrones genera un haz de alta energía que se dirige hacia la muestra a través de lentes electromagnéticas, asegurando un enfoque preciso. Al interactuar con la superficie, el haz produce diversos tipos de señales, como electrones secundarios que generan imágenes topográficas detalladas, revelando las

características superficiales de la muestra y electrones retro dispersados que permiten identificar contrastes relacionados con la composición química del material.

Estas señales son capturadas por detectores especializados, que las procesan y convierten en imágenes de alta resolución, brindando una visualización precisa de la muestra analizada. Además, el microscopio está equipado con un sistema de Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS), que permite identificar y cuantificar los elementos presentes en áreas específicas, proporcionando un análisis químico detallado (Metalinspec, s.f.) .

Figura 2.7. Microscopia electrónica de barrido (SEM).

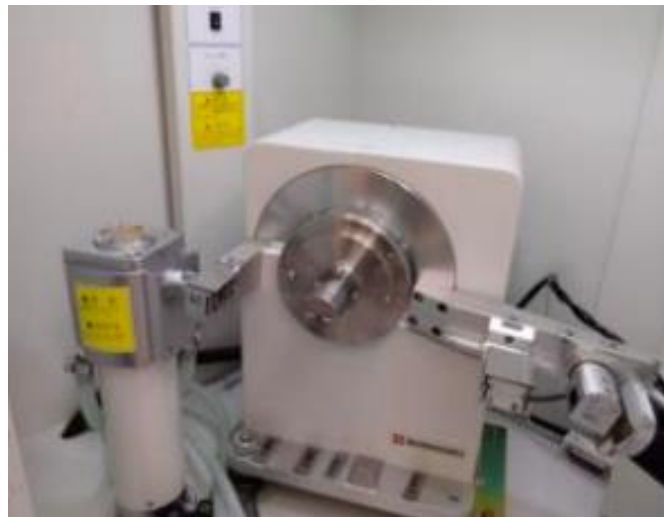


#### **2.4.7. Difracción de rayos x.**

La Difracción de Rayos X (DRX) es una técnica fundamental en el análisis estructural de materiales cristalinos, ampliamente utilizada en campos como la ciencia de materiales y la metalurgia. Esta técnica permite estudiar la disposición atómica dentro de un cristal y obtener información clave sobre parámetros estructurales como los espaciamentos interplanares, las tensiones internas y las composiciones químicas (Mazuelas Esteban, 2002).

La Difracción de Rayos X (DRX) funciona al dirigir un haz de rayos X de longitud de onda específica hacia un material cristalino. Los rayos X interactúan con los átomos del cristal y son dispersados por los electrones de las capas atómicas, generando un patrón característico de difracción. Este patrón es único para cada material y depende de la disposición de los átomos y las distancias entre los planos cristalinos. A través de modelos analíticos, como la ley de Bragg, se interpreta este patrón para determinar la estructura cristalina del material, incluyendo parámetros como los espaciamientos interplanares, tensiones internas y composición química (Mazuelas Esteban, 2002).

Figura 2.8. Difractómetro de rayos x.



### **3 CAPÍTULO III METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.**

Esta sección es un componente fundamental en la investigación, ya que proporciona el marco sistemático y riguroso necesario para llevar a cabo el estudio el cual busca responder preguntas específicas y validar la hipótesis mencionada. Se describen tanto los procedimientos experimentales como los instrumentos y técnicas utilizadas para recopilar datos de manera objetiva y precisa.

### **3.1. Materiales y Equipos.**

Los estudios para analizar la factibilidad de recuperar estroncio y litio se realizaron utilizando salmuera de rechazo colectada en una planta de ósmosis inversa de la Región de Atacama, así como soluciones sintéticas que contenían estroncio y litio. Las soluciones sintéticas se prepararon disolviendo cloruro de estroncio ( $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) y cloruro de litio ( $\text{LiCl}$ ), p.a. EMSURE, en agua desmineralizada. Como reactivos precipitantes, se emplearon hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y cloruro de aluminio ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Para la adsorción, se utilizó carbón activado granular de cáscara de coco y dos tipos diferentes de resinas de intercambio iónico.

La caracterización química general de la salmuera se llevó a cabo mediante mediciones de pH con un pH-metro multiparámetro Edge® HI2020, de turbidez con un Turbidímetro Hanna, modelo HI 98703, y de conductividad con un Conductímetro marca Orion Star, modelo A320. La caracterización química específica, para determinar la concentración de los diferentes iones presentes en la salmuera y en las soluciones sintéticas, se realizó mediante Espectroscopia de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) en el equipo Optima 8000 de Perkin Elmer y Espectrometría de Absorción Atómica (AAS) en el equipo PinAAcle 900F de Perkin Elmer.

La caracterización de los precipitados formados se realizó utilizando técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con el modelo Zeiss EVO MA10, equipado con un detector EDS Oxford, modelo X-MaxN 20 SDN, y un difractómetro de rayos X, modelo Shimadzu XRD 6100.

Los ensayos de adsorción se realizaron en un agitador orbital marca ZHCHENG modelo ZHWY-200D. Los precipitados formados fueron separados de la solución mediante filtración al vacío y centrifugación. Para la filtración se implementó un sistema compuesto por un Kitasato de vidrio con un embudo Büchner de porcelana, una bomba de vacío marca Arquimed modelo N° 617CD32 de 220 V, como medio filtrante se utilizó papel filtro

Whatman N°2 con tamaño de poro de 8  $\mu$ m y diámetro de 150 mm. Para la centrifugación se utilizó una centrífuga IEC CENTRA CL2.

### **3.2. Metodologías.**

#### **3.2.1. Colecta de muestra.**

La muestra de 80 L de salmuera fue colectada en la tubería de descarga de la salmuera de rechazo la planta de osmosis inversa perteneciente a Aguas CAP. La planta se ubica a 25 km al norte de Caldera en la Región de Atacama, abastece de agua desalinizada a todas las faenas de CMP en el Valle de Copiapó y entrega agua en Caldera y Mal Paso como parte del plan de cumplimiento ambiental de Minera Caserones.

#### **3.2.2. Caracterización química general de la salmuera de rechazo.**

**pH:** Para determinar el pH de la salmuera con el medidor de pH multiparámetro Edge® HI2020, primero se calibra el instrumento utilizando soluciones buffer estándar de pH 4, 7 y 10, siguiendo los protocolos establecidos por el fabricante. Luego, se verifico que la muestra esté a temperatura ambiente y bien mezclada, y se enjuago el electrodo con agua destilada. Posteriormente se introduce el electrodo en la salmuera y espera a que se establezca la lectura en la pantalla del pH-metro. Finalmente, se enjuaga el electrodo con agua destilada y guárdalo adecuadamente para mantener su precisión (Manual Hanna Instruments).

**Conductividad:** Para determinar la conductividad de la salmuera con medidor de conductividad Orion Star A320, primero se calibra el instrumento utilizando soluciones estándar de conductividad conocida. Luego, se verifico que la muestra esté a temperatura ambiente y bien mezclada. Se enjuago el electrodo con agua desmineralizada para evitar contaminaciones y posteriormente, se introduce en la salmuera, esperando a que la lectura se establezca en la pantalla del conductímetro. Finalmente, enjuaga el electrodo nuevamente con agua desmineralizad y se guarda según las recomendaciones del fabricante para mantener su precisión (Manual Orion Instruments).

**Densidad:** La densidad de la salmuera, se determinó utilizando el método del picnómetro. Para llevar a cabo la medición, se emplearon los siguientes elementos: una balanza analítica de alta precisión, agua desmineralizada, la muestra de salmuera, y un picnómetro calibrado con un volumen nominal de 50 mL.

$$Densidad = \left( \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \right) * \rho_a$$

Donde:

$m_0$  = Masa del picnómetro vacío.

$m_1$  = Masa del picnómetro con agua.

$m_2$  = Masa del picnómetro con salmuera.

$\rho_a$  = Densidad del agua a temperatura experimental.

**Turbidez:** La turbidez fue determinada utilizando un turbidímetro Hanna HI 98703. Para garantizar lecturas precisas, el equipo fue calibrado previamente utilizando patrones estándar de turbidez (<0,10, 15, 100 y 750 NTU).

Posteriormente, las muestras de salmuera fueron agitadas suavemente para homogeneizar su contenido y evitar la formación de burbujas, ya que estas podrían interferir en la medición. Una vez preparadas, las muestras se colocaron cuidadosamente en cubetas limpias y transparentes, asegurando su correcta inserción en el compartimento del Turbidímetro (Manual Turbidímetro Hanna Instruments).

### 3.2.3. Caracterización química específica

Para determinar la concentración de sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), bromo ( $\text{Br}^-$ ), boro ( $\text{B}^{3+}$ ), estroncio ( $\text{Sr}^{2+}$ ) y litio ( $\text{Li}^+$ ) contenida en la salmuera utilizando Espectroscopia de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), primero se diluye la muestra y calibra el equipo con soluciones estándar conocidas. Luego se introduce la muestra en el nebulizador para convertirla en aerosol y transportarla al plasma,

donde se genera una emisión de luz característica de cada elemento. El equipo mide la intensidad de esta luz, que se compara con las curvas de calibración para obtener las concentraciones precisas de cada elemento en la muestra (Jiménez et al., 2020).

La concentración de estroncio y litio también fue determinada usando un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS). Para ello, primero se diluye la muestra, y calibra el equipo con soluciones estándar conocidas. Luego se nebuliza y atomiza la muestra en una llama u horno de grafito, creando átomos en estado gaseoso que absorben luz en longitudes de onda específicas. Finalmente, se mide la absorción de luz y compara los datos con curvas de calibración para obtener las concentraciones de estroncio y litio (Cuellar et al., 2018).

### **3.2.3. Caracterización de fases sólidas.**

Para caracterizar precipitados formados mediante difracción de rayos X en un Difractómetro Shimadzu modelo XRD 6100, primero se calibró el difractómetro y se configura la longitud de onda adecuada. Posteriormente, la muestra de precipitado en polvo se coloca en el soporte del equipo y se realiza un escaneo en el rango de ángulos  $2\theta$  desde  $10^\circ$  hasta  $80^\circ$ . Los datos obtenidos se analizan comparando los picos del difractograma con bases de datos de referencia para identificar y cuantificar los compuestos presentes. Finalmente, los resultados se interpretan y se comparan con muestras conocidas para validar las concentraciones obtenidas (Reyes 2013).

Para caracterizar los precipitados formados mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con detector EDS Oxford, los precipitados se colocan sobre un soporte del SEM. Luego, se calibra y configura el equipo, asegurando que el detector EDS esté preparado. A continuación, se escanea la muestra para obtener imágenes de alta resolución y se analiza la composición elemental mediante el detector EDS. Finalmente, se examinan las imágenes y los espectros obtenidos para identificar y cuantificar los elementos presentes (Clavijo, 2013).

### **3.3 Estudios de precipitación.**

#### **3.3.1 Ensayos para precipitar selectivamente los iones Mg, Na, K y Ca.**

Se evaluó la viabilidad de precipitar de forma selectiva los cationes magnesio, sodio, potasio y calcio, presente en salmueras de rechazo y cuya concentración es mayor a 700 mg/L, empleando el proceso de evaporación y precipitación con hidróxido de calcio.

Evaporación: Para precipitar selectivamente los iones magnesio, sodio, potasio y calcio, mediante evaporación la salmuera se sometió a un proceso de calentamiento controlado. Durante el proceso de evaporación, la reducción del volumen de agua incrementa la concentración iónica en la salmuera hasta que algunas sales sobrepasan sus límites de solubilidad y cristalizan. Primero precipitan las sales menos solubles (por ejemplo, compuestos de calcio), seguidas por el cloruro de sodio y, finalmente, los cloruros o sulfatos de magnesio y potasio, dependiendo de la composición.

Se inició el experimento con 1 L de salmuera, evaporando gradualmente el agua a 98 °C mediante un agitador magnético Nuova Stir Plate con control de temperatura. Durante el proceso, se observó una reducción progresiva del volumen: a los 60 minutos, el volumen se redujo a 800 mL; a los 120 minutos, a 600 mL; a los 180 minutos, a 400 mL; a los 230 minutos, a 200 mL; y a los 280 minutos, a 100 mL. En cada intervalo de tiempo, se recolectó una muestra de 50 mL para análisis. Al alcanzar un volumen de 400 mL, se formaron los primeros precipitados, los cuales fueron retirados mediante filtración al vacío. Posteriormente, el líquido filtrado se evaporó nuevamente hasta alcanzar un volumen de 200 mL, etapa en la que se retiraron los nuevos precipitados mediante el mismo procedimiento. Finalmente, el proceso se repitió cuando el volumen se redujo a 100 mL, retirando nuevamente los sólidos precipitados mediante filtración al vacío.

Figura 3.4. Proceso de evaporación



Precipitación hidróxido de calcio: Los ensayos se realizaron con 100 mL de salmuera natural y se empleó hidróxido de calcio sólido con una pureza del 99,9 % para ajustar su pH. Los experimentos se realizaron de manera independiente para cada valor de pH (10, 12 y 14). En cada experimento, la cal se agregó gradualmente a la salmuera mientras se agitaba continuamente con un agitador magnético para garantizar una reacción uniforme. A medida que se alcanzaba el pH deseado, se observó la formación de precipitados, los cuales fueron separados mediante filtración al vacío utilizando un embudo Büchner y papel filtro de poros fino. Los sólidos obtenidos se secaron en un horno a 80 °C durante 24 horas para eliminar la humedad residual y se almacenaron en recipientes herméticos para su posterior análisis.

### 3.3.2. Ensayos para precipitar los iones Sr y Li.

Se llevaron a cabo ensayos para determinar la factibilidad de precipitar estroncio y litio a partir de salmuera natural, salmuera evaporada y soluciones sintéticas, empleando carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y cloruro de aluminio hexahidratado ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) como reactivos precipitantes.

Carbonato de sodio: Los ensayos se realizaron con 100 mL de cada muestra (salmuera natural, salmuera evaporada y soluciones sintéticas) en vasos de precipitado limpios; a continuación, se elaboró la solución precipitante disolviendo carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a una concentración de 2 mol/L. Con la ayuda de jeringas graduadas, se añadieron gradualmente volúmenes de 1, 3, 5, 10, 15 y 20 mL de esta solución precipitante a cada muestra, bajo agitación constante con un agitador magnético a temperatura ambiente, durante 2 horas, para garantizar la mezcla uniforme de reactivos. Una vez transcurrido el tiempo de reacción, se separó el precipitado mediante filtración al vacío empleando un embudo Büchner; los sólidos retenidos en el filtro se enjuagaron suavemente con agua destilada, se secaron en un horno a 80 °C hasta masa constante y se almacenaron para su posterior caracterización mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). El licor filtrado se recopiló y conservó en recipientes etiquetados para su análisis químico mediante ICP-OES y/o AAS, a fin de cuantificar la concentración remanente de  $\text{Sr}^{2+}$  y  $\text{Li}^+$  y, de esta manera, evaluar la eficiencia del proceso de precipitación.

Cloruro de aluminio hexahidratado: Los ensayos también se realizaron 100 mL de cada muestra (salmuera natural, salmuera evaporada y soluciones sintéticas) en vasos de precipitado limpios; posteriormente, se preparó la solución precipitante disolviendo cloruro de aluminio hexahidratado ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) a una concentración de 2 mol/L. Con la ayuda de jeringas graduadas, se añadieron gradualmente volúmenes de 1, 3, 5, 10, 15 y 20 mL de esta solución precipitante a cada muestra, mientras se agitaba la mezcla de manera constante con un agitador magnético. A continuación, el pH de cada solución se ajustó a 10 mediante la adición de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ), monitoreando de forma continua con un pH-metro calibrado. Una vez alcanzado el pH deseado, se mantuvo la agitación durante 2 horas a temperatura ambiente para promover la formación de los precipitados. Cumplido el tiempo de reacción, cada suspensión se filtró al vacío empleando un embudo Büchner, se enjuagaron

los sólidos retenidos con agua destilada y posteriormente se secaron en una estufa a 80 °C. Finalmente, los precipitados secos se almacenaron para análisis posteriores y el líquido filtrado se guardó en recipientes debidamente etiquetados, con el fin de evaluar la eficiencia de la precipitación.

### **3.4 Estudio de Adsorción**

Se realizaron estudios de adsorción para evaluar la factibilidad de extraer estroncio y litio a partir de salmueras naturales y soluciones sintéticas, utilizando carbón activado de cascara de coco y dos tipos diferentes de resinas de intercambio iónico. La resina 1, Lewatit Mono Plus TP-214, macroporos, 43-48% de humedad, grupo funcional tiourea, tamaño de partícula de 400 a 1250 micrones, capacidad 1 meq/mL por volumen de lecho húmedo y la resina 2, base aluminio, densidad es de 0.62 g/cm<sup>3</sup> y con tamaño de partícula de 2200 micrones.

#### **3.4.1 Carbón Activado**

Acondicionamiento: Antes de los ensayos de adsorción, el carbón activado fue sometido a una etapa de acondicionamiento para eliminar las posibles impurezas solubles presentes en el material. Este acondicionamiento se realizó mezclando 50 g de carbón activado en 0,8 L de solución de ácido clorhídrico (HCl) ajustada a pH 2, y agitando la mezcla a una velocidad de 270 rpm durante 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo de agitación, el carbón activado fue separado de la solución ácida mediante filtración al vacío. Posteriormente, el carbón activado se lavó dos veces con agua desmineralizada para remover cualquier residuo residual y, finalmente, se secó en un horno a 80 °C hasta alcanzar una humedad constante

Ensayos de adsorción: Los ensayos de adsorción para la recuperación de estroncio y litio se realizaron con diferentes concentración de carbón activado, para ello, se determinaron las cantidades necesarias de carbón activado para obtener concentraciones finales de 1, 2, 5, 10 y 15 g/L en 200 mL de salmuera natural, soluciones conteniendo solo iones estroncio, soluciones conteniendo sólo iones litio y soluciones contiendo iones estroncio y litio. Adicionalmente, en el caso de la solución contiendo solo litio, se emplearon concentraciones más altas de carbón activado (30, 60, 120 y 150 g/L) para analizar el efecto de una dosificación mayor sobre la recuperación de litio.

Las muestras de salmuera natural y las sintéticas fueron mezclada con diferentes masa de carbón activado y sometidas a agitación constante en un agitador tipo Shaker a una velocidad de 380 rpm durante 24 horas a temperatura ambiente (25 °C). Este procedimiento aseguró un contacto eficiente entre el carbón activado y las soluciones, maximizando las posibilidades de adsorción. Al finalizar el tiempo de agitación, las soluciones fueron filtradas para separar los sólidos del líquido. El líquido recuperado fue analizado mediante espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y/o espectroscopia de absorción atómica (AAS) para determinar las concentraciones finales de litio y estroncio, lo que permitió evaluar la eficiencia del proceso de adsorción.

### **3.4.2. Resinas de intercambio iónico.**

Acondicionamiento: Las resinas son sometidas a un proceso de lavado con agua desmineralizada. Para ello, se colocan en un embudo equipado con un filtro de tamaño fino, permitiendo que un flujo continuo de aproximadamente 3 litros de agua desmineralizada escurra a través de ellas durante 20 minutos. Este procedimiento tiene como finalidad eliminar el exceso de litio presente en la resina, mejorando así su capacidad de adsorción.

Ensayos de intercambio iónico: Los ensayos con ambos tipo de resina se realizaron con 200 mL de salmuera de rechazo y soluciones sintéticas conteniendo estroncio y litio. En cada experimento se agregaron diferentes concentraciones de resina: 1, 2, 5, 10 y 15 g/L. Estas concentraciones fueron seleccionadas para evaluar el efecto de la cantidad de resina en la capacidad de adsorción de estroncio y litio.

Las mezclas fueron sometidas a agitación constante en un agitador tipo Shaker, operando a 380 rpm durante 24 horas a una temperatura de 25 °C. Este procedimiento permitió un contacto uniforme y eficiente entre la solución y las partículas de resina, lo cual es esencial para maximizar la interacción entre los iones estroncio y litio y las partículas de resina.

Al término del procedimiento, las soluciones fueron filtradas al vacío para separar la fase sólida (resina) de la fase líquida. El líquido filtrado fue almacenado en condiciones controladas para su posterior análisis químico mediante espectrometría de emisión óptica con

plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y la espectroscopia de absorción atómica (AAS). Estos análisis permitieron determinar la concentración residual de litio en la solución y calcular la eficiencia del proceso de adsorción de cada experimento.

### 3.5. Evaluación de la recuperación de estroncio y litio.

La recuperación de estroncio y litio desde la salmuera mediante precipitación y adsorción fue calcula con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \cdot 100$$

Donde:

R, recuperación de estroncio o litio en forma de precipitado o adsorbido, %.

C<sub>i</sub>, concentración inicial de estroncio o litio, mg/L

C<sub>f</sub>, concentración final de estroncio o litio, mg/L

Para medir la variabilidad de los experimentos realizados en duplicado se calculó la desviación estándar mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Donde:

σ = Desviación estándar.

x<sub>i</sub> = Cada valor del conjunto de datos.

$\bar{x}$  = Media aritmética del conjunto de datos.

n = Numero de datos.

## 4 CAPITULO IV Resultados y Discusiones.

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de los diferentes estudios experimentales realizados. Cada sección aborda los hallazgos más relevantes,

interpretando los datos en función de los objetivos planteados y discutiendo su significado en el contexto de la investigación. Estos resultados permiten evaluar la efectividad de los métodos aplicados y establecer conclusiones fundamentadas sobre el comportamiento de las soluciones estudiadas.

#### **4.1 Caracterización química de la salmuera de rechazo.**

La caracterización química inicial de la salmuera se realizó para establecer sus propiedades fisicoquímicas antes de los experimentos. Los resultados obtenidos se pueden observar en los siguientes apartados.

En la tabla 4.1., se presentan los parámetros fisicoquímicos de la salmuera estudiada.

Tabla 4.1. Parámetros fisicoquímicos salmuera inicial.

Parámetro	Valor	Unidad
pH	7,99	-
Conductividad	76,7	ms/cm
Turbidez	0,27	NTU

La conductividad eléctrica de la salmuera inicial (76,7 mS/cm) indica una elevada concentración de sales disueltas, especialmente de cloruros y sodio. Estos valores pueden compararse con los reportados por López (López et al., 2021) en salmueras de salares sudamericanos, donde las conductividades alcanzaron valores superiores a 100 mS/cm en sistemas de alta concentración, principalmente debido al enriquecimiento en cloruro de sodio y potasio. Por otro lado, González-Partida (González-Partida et al., 2008) identificaron valores de conductividad que oscilan entre 50 y 85 mS/cm en salmueras de cuencas petroleras, reflejando una composición menos saturada. Estas comparaciones resaltan que la salmuera estudiada se encuentra en un rango intermedio, sugiriendo un equilibrio moderado entre la salinidad y el contenido de agua.

La densidad de la salmuera medida es de 1,005 g/ml, indicador clave de su concentración salina. Este valor es inferior a los reportados por Rojo (Rojo et al., 2003) en el Valle Salado de Añana, donde las densidades típicas oscilan entre 1,15 y 1,20 g/ml debido a la alta

saturación de NaCl (250 g/L, equivalente al 80% de saturación). Este contraste sugiere que la salmuera analizada contiene una menor cantidad de sales disueltas, probablemente influenciada por condiciones de dilución o menor interacción con depósitos salinos.

El pH ligeramente alcalino de la salmuera inicial (7,99) refleja un equilibrio químico que favorece la estabilidad de compuestos como carbonatos y bicarbonatos, similar a lo reportado en salmueras de otros sistemas geológicos. Por ejemplo, en el estudio de López (López et al., 2021), los valores de pH en salmueras de salares oscilaron entre 7,5 y 8,5, asociados a la desorción de CO<sub>2</sub> y la baja concentración de ácidos orgánicos.

#### **4.2 Caracterización química específica.**

La salmuera de rechazo objeto de estudio fue analizada utilizando la técnica de Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) correspondiente al set 7. Los resultados obtenidos permitieron identificar los elementos presentes en dicha salmuera, los cuales se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.2. Elementos presentes en salmuera inicial.

Elementos	Concentración (mg/L)
Ca	774,5
K	758
Mg	2473,5
Na	21705
Sr	15,4
Li	3,8

La siguiente tabla 4.3 presenta las concentraciones de los principales elementos encontrados en la salmuera residual de procesos industriales estudiadas por (León Duharte et al., 2006).

Tabla 4.3. Elementos presentes en salmuera residual (León Duharte et al., 2006).

Elementos	Concentración (mg/L)
K	8592.00
Br	1295.38
Cl	19657.75
Na	85552.80
SO4	3842.40
Mg	28785.80

### 4.3 Estudios de precipitación.

#### 4.3.1 Evaporación de la salmuera.

Los elementos presentes en la salmuera de rechazo (Tabla 4.2) sufren un notable incremento en sus concentraciones al someterse a diferentes volúmenes de evaporación, como se observa en las Tablas 4.4. Este análisis es clave para entender las dinámicas de concentración de los elementos en función del porcentaje de evaporación alcanzado.

Tabla 4.4. Elementos incrementados en la salmuera evaporada a diferentes volúmenes.

Tiempo (min)	% Evaporación	Concentración de elementos (mg/L)					
		Ca <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	Sr <sup>+2</sup>	Li <sup>+</sup>
0	0	774,5	758	2474	21705	15,4	3,8
60	20	1045,0	1070	3298	20705	16,0	4,5
120	40	1331,5	1279	4155	35635	19,2	5,6
180	60	1314,0	1664	5145	45030	24,3	8,1
230	80	669,0	2966	9524	84940	7,9	10,2
280	90	385,1	5102	16388	99240	1,5	16,1

La Tabla 4.4 presenta las concentraciones de los principales elementos tras la evaporación de la salmuera hasta un 80 % de su volumen inicial. En este estado, los elementos con mayor concentración son el sodio (Na), seguido por el magnesio (Mg), el potasio (K) y el litio (Li).

En contraste, elementos como el calcio (Ca) muestran una reducción del 50 %, mientras que el estroncio (Sr) disminuye en un 81 %. Además, la Figura 4.1 permite visualizar la comparación entre la salmuera original y la evaporada al 80%, evidenciando los cambios en su composición química.

Por otro lado, la figura 4.2 refleja las concentraciones de estos mismos elementos tras evaporar la salmuera al 90 % de su volumen inicial. En este punto, las concentraciones de sodio (Na) y magnesio (Mg) se incrementan significativamente. Asimismo, se observa un aumento en el potasio (K) y en el litio (Li). Sin embargo, el calcio (Ca) del 50% al igual que en el punto anterior y el estroncio (Sr) muestran una disminución en sus concentraciones del 90%.

Estos resultados evidencian que la evaporación intensifica la concentración de ciertos elementos en la salmuera, como el sodio, magnesio y litio.

El modelo desarrollado por Harvie, Møller y Weare (1984) describe cómo la evaporación de salmueras provoca un aumento progresivo en las concentraciones de sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg) en la fase líquida, mientras que elementos como calcio (Ca) y estroncio (Sr) tienden a precipitar rápidamente como yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y estroncianita ( $\text{SrCO}_3$ ). Este proceso se debe a las diferencias en los productos de solubilidad de los iones presentes. En etapas avanzadas de evaporación, los iones de sodio cristalizan como halita ( $\text{NaCl}$ ), mientras que potasio y magnesio forman silvita ( $\text{KCl}$ ) y carnalita ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Estos resultados coinciden con el incremento significativo observado experimentalmente en Na, K y Mg en la salmuera analizada, junto con la reducción de Ca y Sr debido a su precipitación.

Figura 4.1. Gráfico de elementos y concentración de elementos (mg/L) en salmuera evaporada 80%.

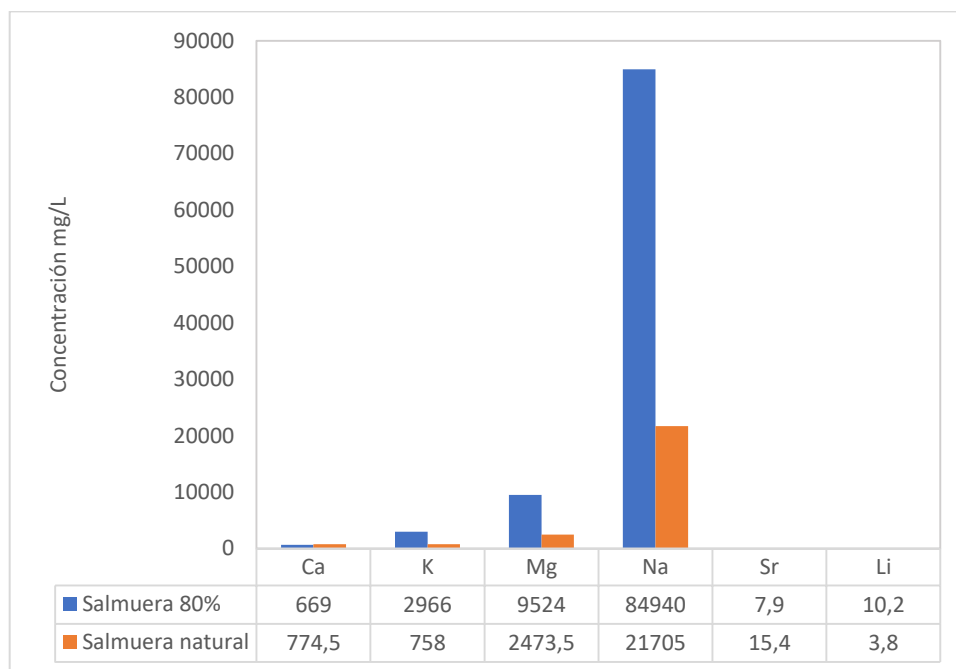
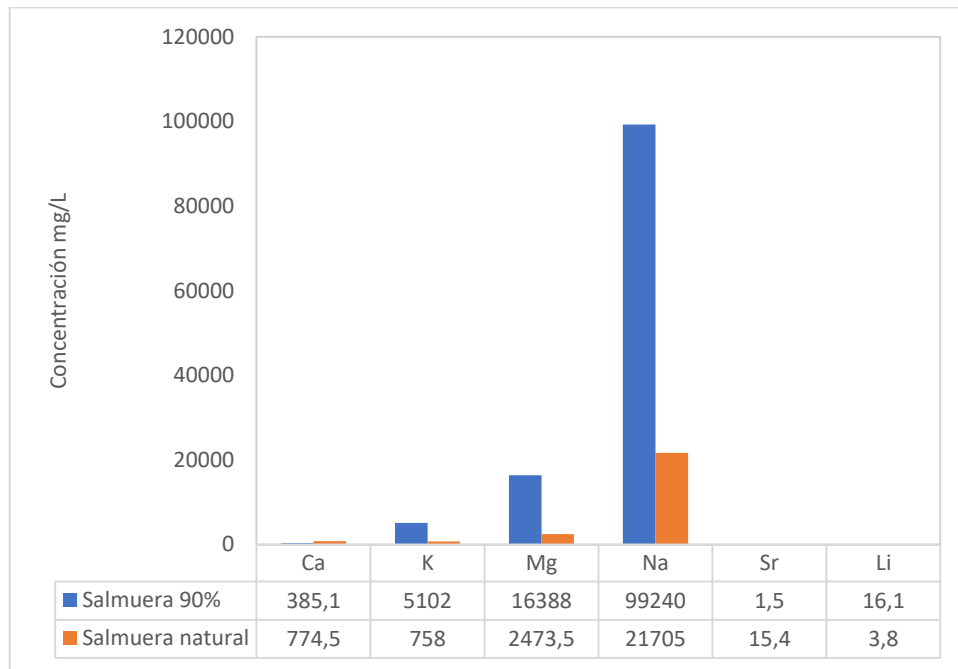


Figura 4.2. Gráfico de elementos y concentración de elementos (mg/L) en salmuera evaporada 90%.



Otro punto que se observa cambios al realizar la evaporación de la salmuera son sus condiciones iniciales fisicoquímicas, donde analizamos conductividad y pH, los resultados se pueden observar en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Condiciones fisicoquímicas salmueras evaporadas 80% y 90%.

	Salmuera evaporada 80%	Salmuera evaporada 90%
pH	8,8	8,6
Conductividad (ms/cm)	183	189

Los datos muestran que, al aumentar el grado de evaporación, se producen cambios en las propiedades de la salmuera, particularmente en el pH y la conductividad.

El pH se observa un incremento que podría explicarse por la concentración de especies químicas alcalinas que elevan la alcalinidad de la solución. Sin embargo, al llegar al 90 % de evaporación, la ligera disminución del pH sugiere la posible formación de precipitados de carbonatos de calcio o magnesio.

En cuanto a la conductividad, se observó un incremento de 183 mS/cm a 189 mS/cm al pasar del 80 % al 90 % de evaporación. Este comportamiento se debe al aumento en la concentración de los elementos presentes en la salmuera, como sodio, magnesio y potasio, que son altamente conductores. Este incremento es consistente con los resultados presentados previamente, donde se muestra un aumento significativo en las concentraciones de estos elementos durante el proceso de evaporación.

Además, se observó que, durante el proceso de evaporación, a partir de una reducción del 60 % del volumen, comenzó la precipitación incipiente de ciertos elementos presentes en la salmuera, los cuales fueron analizados mediante difracción de rayos X.

El análisis de los difractogramas de rayos X correspondientes a las salmueras evaporadas al 90% y 80% proporciona una caracterización detallada de las fases cristalinas presentes en los precipitados formados durante el proceso de evaporación.

En el caso del difractograma de rayos X (Figura 4.3), se identifican dos fases cristalinas principales en la muestra. Los picos más intensos están asociados con la halita (NaCl), identificada con la referencia PDF 00-005-0628, lo que confirma que esta fase es predominante. También se observan picos menos intensos correspondientes a calcio o compuestos relacionados, como el yeso (PDF 00-022-0520), indicando que esta fase está presente en menor proporción. La predominancia de los picos de NaCl resalta al sodio como el elemento dominante en los precipitados cristalinos, consistente con los procesos de evaporación natural, donde el sodio tiende a precipitar primero al alcanzar su límite de saturación en forma de halita. La presencia de calcio, aunque en menor proporción, sugiere la formación de compuestos adicionales o su integración en estructuras cristalinas menores.

Por otro lado, el difractograma de la Figura 4.4 presenta picos principales asociados con dos fases cristalinas: sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), identificado con la referencia PDF 00-045-0157, y sulfuro de estroncio ( $\text{SrS}_6$ ), identificado con la referencia PDF 00-047-1018. La intensidad de los picos correspondientes al  $\text{CaSO}_4$  indica que esta es la fase dominante en esta muestra, mientras que los picos relacionados con el  $\text{SrS}_6$  son menos intensos, reflejando una menor proporción de esta fase. La cristalización del calcio en forma de yeso durante la evaporación es común en salmueras con alta concentración de sulfatos. Por su parte, el  $\text{SrS}_6$  refleja la participación del estroncio en la formación de compuestos específicos, posiblemente como resultado de condiciones localizadas de saturación iónica durante la evaporación.

Estos resultados concuerdan con los estudios realizados en el Salar de Llamara, Chile, donde la técnica de difracción de rayos X confirmó la presencia predominante de halita ( $\text{NaCl}$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) como fases cristalinas formadas durante procesos naturales de evaporación en ambientes salinos (Pueyo, Chong y Jensen, 1999). Este estudio resalta la importancia del equilibrio químico y la saturación de iones en la formación de fases sólidas específicas.

A su vez el modelo desarrollado por Harvie, Møller y Weare (1984) explica que, durante la evaporación de salmueras, elementos como calcio (Ca) y estroncio (Sr) precipitan rápidamente en forma de compuestos sólidos debido a sus bajos productos de solubilidad. En particular, el calcio se cristaliza como yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), mientras que el estroncio lo hace como estroncianita ( $\text{SrCO}_3$ ). Estos procesos ocurren en las primeras etapas de evaporación, ya que estos compuestos alcanzan rápidamente sus límites de saturación.

En etapas avanzadas de evaporación, otros elementos como sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg) también forman fases sólidas específicas. El sodio precipita predominantemente como halita ( $\text{NaCl}$ ), mientras que el potasio y el magnesio generan compuestos como silvita ( $\text{KCl}$ ) y carnalita ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Estas fases cristalinas reflejan las condiciones de saturación y la secuencia de formación de compuestos sólidos durante el proceso de evaporación. Este comportamiento es consistente con lo observado experimentalmente en la salmuera analizada.

Figura 4.3. Difractograma rayos x precipitados de salmuera evaporada 90%.

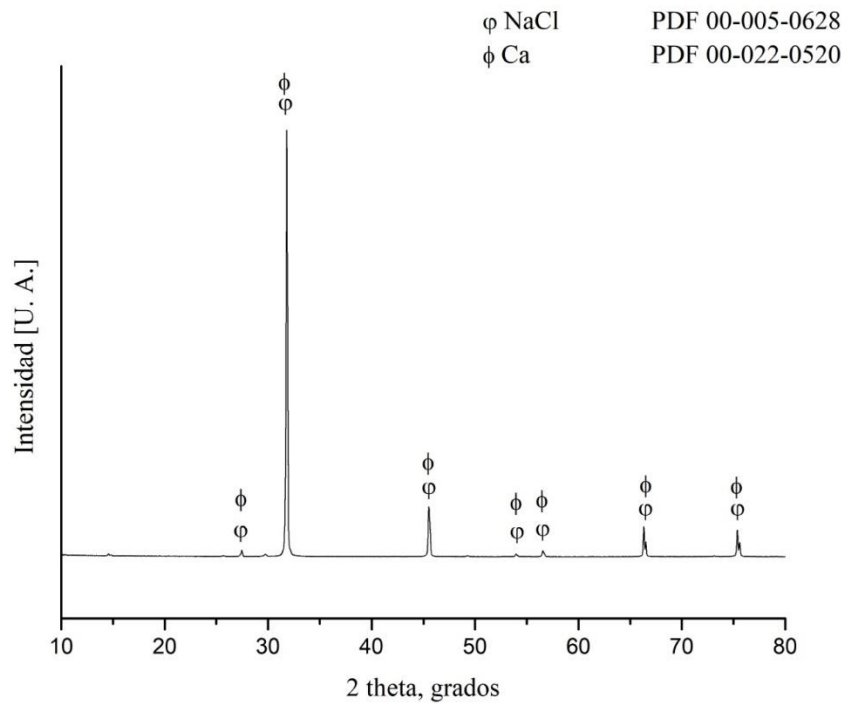
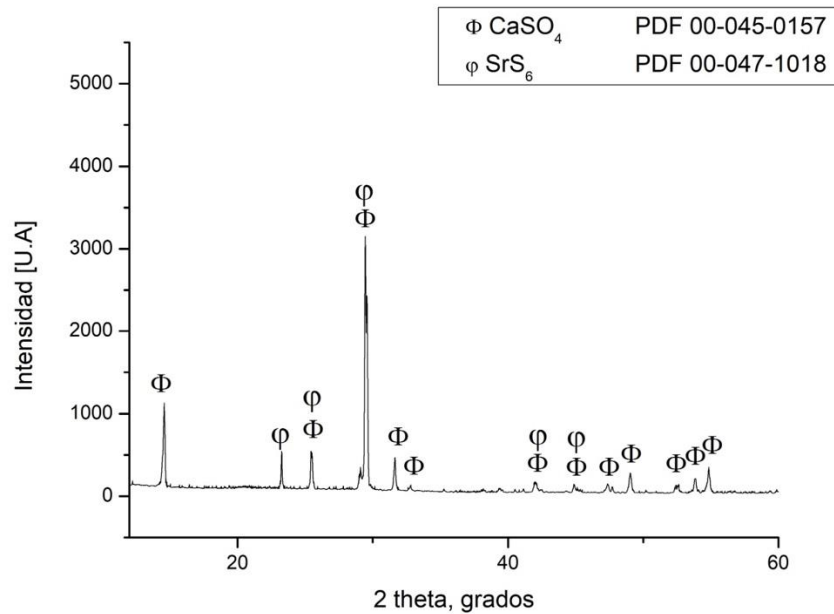


Figura 4.4. Difractograma rayos x precipitados de salmuera evaporada 80%.



#### 4.3.2 Hidróxido de calcio.

En este estudio, el pH de la salmuera fue modificado mediante la adición de hidróxido de calcio en polvo (99.9 % de pureza), alcanzando valores de pH 10 y 12 (Tabla 4.6 y 4.7). Se observó que solo a pH 12 se produjo la formación de precipitados, mientras que a pH 10 no se evidenció un efecto en la precipitación ni en la concentración de la salmuera de rechazo.

La Figura 4.5 presenta la concentración de elementos en la salmuera inicial comparada con la salmuera ajustada a pH 10. Se observa que las concentraciones de Na, K y Mg permanecen prácticamente constantes, lo que sugiere que la adición de hidróxido de calcio a este pH no genera una precipitación significativa de estos elementos. Sin embargo, el estroncio (Sr) y el litio (Li) presentan una leve reducción.

Por otro lado, la Figura 4.6 muestra la composición de la salmuera tras el ajuste a pH 12. En este caso, se observa una precipitación del magnesio (Mg), que desaparece por completo de la solución, lo que confirma su remoción. Asimismo, el calcio (Ca) experimenta un aumento

en su concentración. El sodio (Na) mantiene una concentración estable, indicando que no se ve afectado por el ajuste de pH, mientras que el estroncio (Sr) y el litio (Li) también muestran una reducción, con el litio desapareciendo completamente de la solución.

Por lo tanto, el análisis se centró en el líquido y el sólido obtenidos de la solución con pH 12, donde se confirma la eliminación selectiva de ciertos elementos a través de la precipitación. Esta información es fundamental para comprender el comportamiento químico de la salmuera bajo diferentes condiciones de pH y optimizar su tratamiento y posible recuperación de elementos valiosos.

Tabla 4.6. Concentración de elementos en solución pH 10.

Elementos	Concentración (mg/L)
Ca	751
K	767
Mg	2444
Na	21915
Sr	10,4
Li	3,5

Tabla 4.7. Concentración de elementos en solución pH 12.

Elemento	Concentración (mg/L)
Ca	4239,5
K	761,5
Na	21750
Sr	12,9

Figura 4.5. Gráfico de elementos y concentración de elementos (mg/L) en salmuera con cal añadido pH 12.

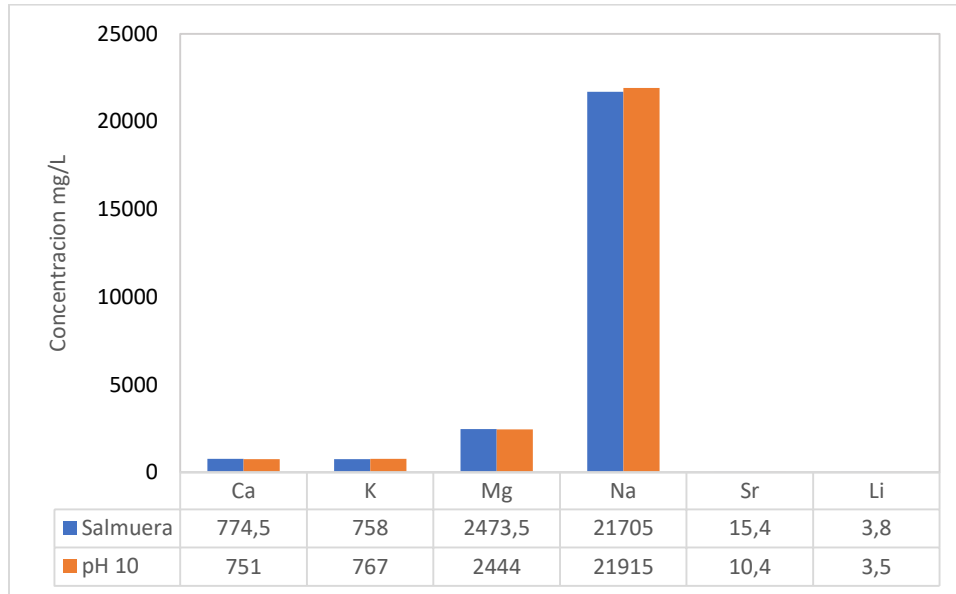
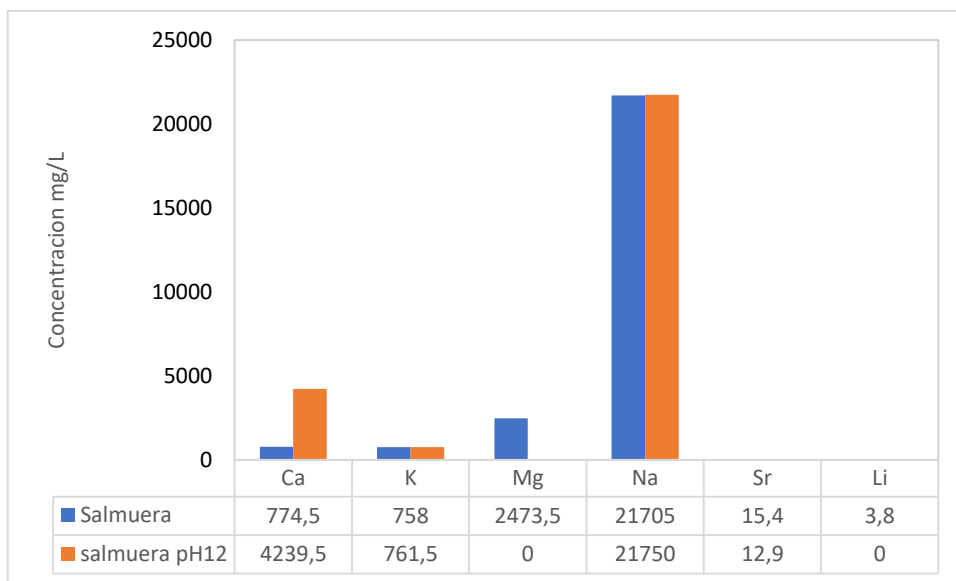


Figura 4.6. Gráfico de elementos y concentración de elementos (mg/L) en salmuera con cal añadido pH 12.



Al comparar los resultados con la salmuera original (Tabla 4.2) se pueden observar los siguientes resultados. El ajuste de pH de la salmuera mediante la adición de cal generó cambios en la composición química. El calcio aumentó de 774,5 mg/L en la salmuera original a 4239,5 mg/L tras el ajuste a pH 12, debido a que la adición de cal ( $\text{CaO}$  o  $\text{Ca(OH)}_2$ ) a soluciones salinas que induce la solubilización de calcio y la formación de carbonatos o hidróxidos de calcio (Purificación de salmueras - Procesamiento de cloruro de sodio). El potasio mostró una variación mínima, pasando de 758 mg/L a 761,5 mg/L, indicando que permanece mayormente en solución. El sodio, con una concentración inicial de 21.705 mg/L, no presentó cambios relevantes, alcanzando 21.750 mg/L, lo que sugiere que no forma precipitados bajo estas condiciones. El estroncio disminuyó de 15,4 mg/L a 12,9 mg/L, probablemente por la precipitación parcial de carbonatos de estroncio debido a la alcalinidad incrementada. Estos resultados reflejan que el pH elevado favorece la precipitación de ciertos elementos como el Mg y Li, mientras otros permanecen estables en solución.

Estos resultados son consistentes con estudios previos que analizan la precipitación de hidróxidos metálicos mediante la adición de cal en soluciones salinas. Por ejemplo, Flores (Flores et al., 2018) investigaron la recuperación de hidróxido de magnesio en salmueras de la Puna argentina, encontrando que el ajuste de pH con óxido de calcio es efectivo para precipitar magnesio en forma de  $\text{Mg(OH)}_2$ . A su vez Crespo reafirma que la adición de cal ( $\text{CaO}$  o  $\text{Ca(OH)}_2$ ) durante el tratamiento de salmueras incrementa el pH de la solución, lo que favorece la precipitación de compuestos como hidróxidos de magnesio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) y carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Este proceso es fundamental para la purificación de salmueras, ya que permite la remoción selectiva de ciertos iones presentes en solución. La formación de precipitados está directamente relacionada con la alcalinidad inducida por la cal y con la concentración de iones susceptibles, como magnesio y calcio, los cuales presentan menor solubilidad a valores de pH elevados (Crespo et al., 1985).

El análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de los sólidos precipitados a pH 12 revela una composición predominantemente formada por carbono (48.4 %), oxígeno (29.4 %) y calcio (15.7 %), lo que indica la posible formación de compuestos ricos en estos elementos. La elevada proporción de carbono podría estar influenciada por el entorno

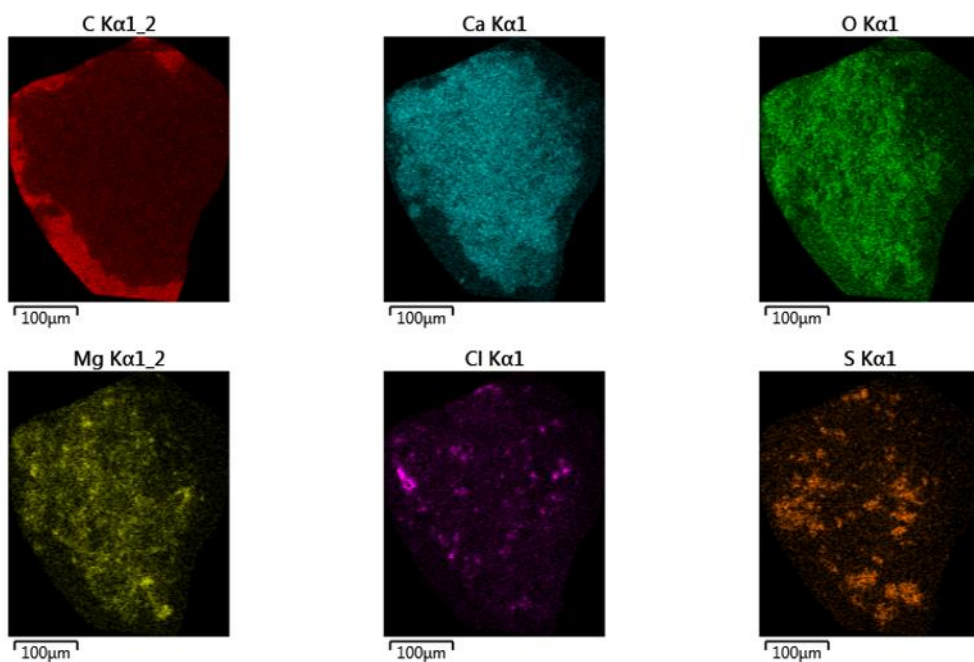
experimental, dado que se utilizó cinta de grafito como soporte para la muestra, lo que podría haber contribuido a su detección en el análisis.

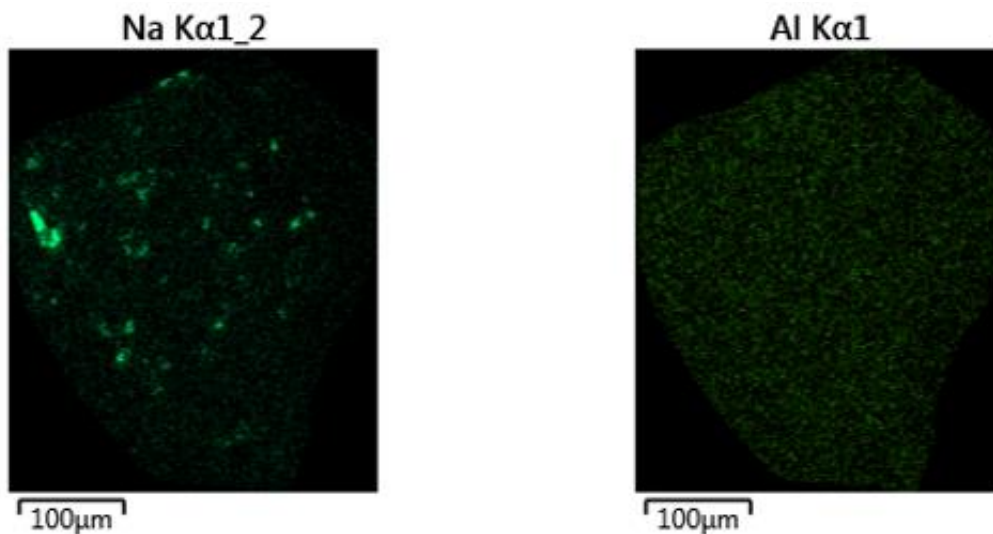
El calcio es el metal principal en los precipitados, probablemente en forma de compuestos oxigenados, mientras que magnesio (2.6 %), cloro (1.8 %), azufre (0.9 %) y sodio (0.7 %) tienen una participación menor. La presencia de aluminio (0.4 %) podría deberse a impurezas del sistema.

En la figura 4.7 se puede observar el mapa elemental y espectro EDS de sólidos precipitados a pH12.

Se observa en la tabla 4.9 la precipitación del 100% de litio, pero al ser poca la concentración de este no se ve reflejado en el análisis obtenido.

Figura 4.7. Mapa Elemental y Espectro EDS de Sólidos Precipitados a pH 12.





La Figura 4.8 presenta el difractograma de rayos X obtenido para los sólidos precipitados tras la adición de cal a la salmuera, ajustando el pH a 12. Este análisis permite identificar las fases cristalinas presentes en el precipitado, proporcionando información clave sobre los compuestos formados durante el proceso de purificación.

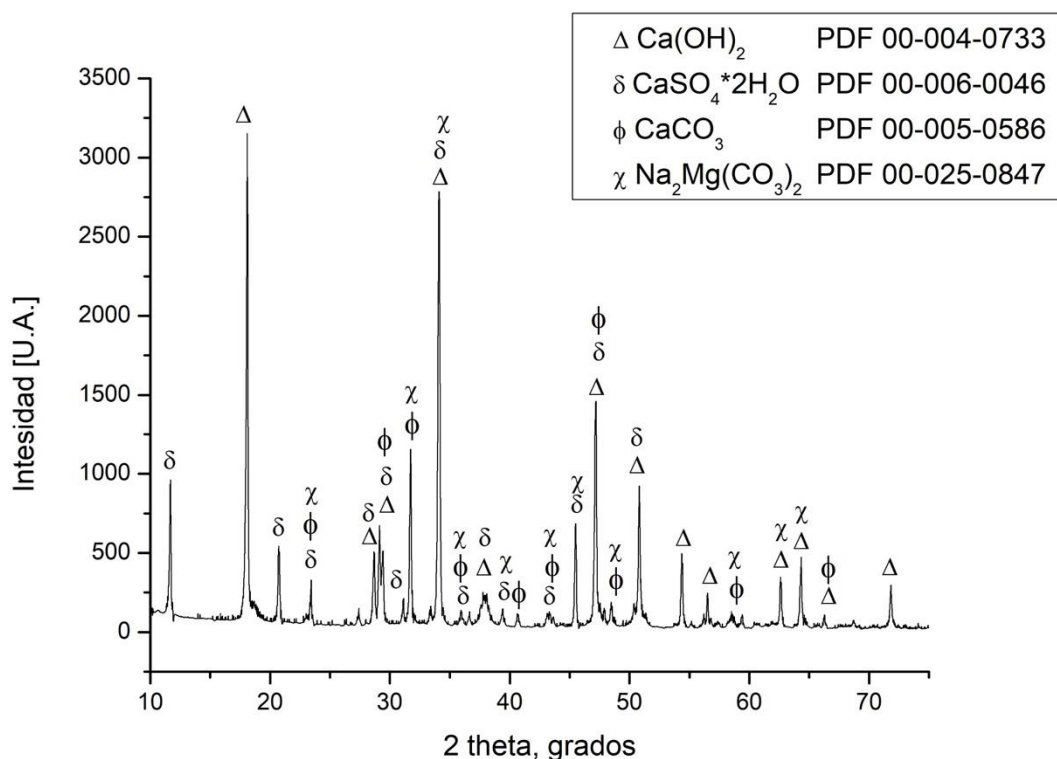
Los picos de difracción observados en el espectro corresponden a la presencia de hidróxidos y carbonatos, compuestos característicos de los procesos de precipitación inducidos por la alcalinidad elevada. La comparación con bases de datos cristalográficas (PDF – Powder Diffraction File) permite la identificación de fases dominantes, entre las que se encuentran carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), y posiblemente hidróxido de magnesio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ).

Estos resultados son consistentes con los análisis previos de composición química mediante microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS), donde se identificaron altos porcentajes de calcio, oxígeno y carbono en el precipitado. La formación de carbonatos e hidróxidos de calcio y magnesio es un comportamiento esperado en soluciones salinas sometidas a un ajuste de pH con cal, dado que estos compuestos presentan baja solubilidad a valores de pH elevados.

El análisis confirma que la adición de cal favorece la precipitación selectiva de ciertos elementos, particularmente el calcio y el magnesio, lo que concuerda con estudios previos sobre la purificación de salmueras mediante precipitación química. La identificación de estas fases cristalinas es fundamental para comprender la eficiencia del proceso y optimizar su aplicación en la recuperación de recursos de interés.

Es importante destacar que, aunque el litio ha sido completamente precipitado según los análisis de concentración en solución, su presencia no es detectable en el difractograma de rayos X. Esto se debe a que la cantidad de litio precipitado es extremadamente baja en comparación con los otros compuestos presentes, lo que impide su identificación en el análisis cristalográfico.

Figura 4.8. Difractograma de rayos x a pH 12.



#### 4.4 Ensayos para precipitar iones Sr y Li.

##### 4.4.1 Carbonato de sodio.

En esta sección, se analiza la precipitación de litio (Li) y estroncio (Sr) a partir de distintas soluciones sometidas a la adición de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Para ello, se llevó a cabo una caracterización inicial de cada solución en términos de concentración de Li y Sr la cual fue realizada por ICP-OES cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.8. Considerando las condiciones iniciales de la salmuera indicadas en la tabla 4.1 y 4.2.

Tabla 4.8. Concentraciones iniciales de litio y estroncio (mg/L).

Solución	Concentración (mg/L)	
	Li	Sr
Salmuera	3,8	15,4
Salmuera evaporada	16,1	1,5
SrCl <sub>2</sub> +LiCl	20	20
LiCl	20	-

Posteriormente, se evaluó el porcentaje de recuperación de Li y Sr en función de la cantidad de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  agregado para cada solución. Los resultados de este análisis se detallan en la Tabla 4.9 y fueron realizados por el método de ICP-OES.

Tabla 4.9. Porcentaje de recuperación de Li en función de la concentración  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (M).

	Concentración de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (M)	% Recuperado
		Li
Salmuera	0,01	99,97
	0,03	99,97
	0,05	99,97
Salmuera evaporada	0,01	99,99
	0,03	78,26
	0,05	26,09
SrCl <sub>2</sub> +LiCl	0,01	52,75
	0,03	55,35
	0,05	58,50
LiCl	0,10	27,50
	0,15	35,35
	0,20	21,90

En la Figura 4.9, 4.10. y 4.11 se puede observar el comportamiento del litio, donde se confirmó que el carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) es un reactivo altamente efectivo para la recuperación de litio (Li), alcanzando porcentajes de precipitación superiores al 99 % en salmueras naturales y evaporadas con adiciones de 0,02-0,03 M. Estos resultados refuerzan lo planteado por Zhang, quién identificó que factores como la temperatura y la relación molar de reactivos desempeñan un papel crítico en la eficiencia de la precipitación (Zhang et Al., 2019).

Figura 4.9. Gráfico de % de Li precipitado respecto a la cantidad añadida de carbonato de sodio salmuera de rechazo.

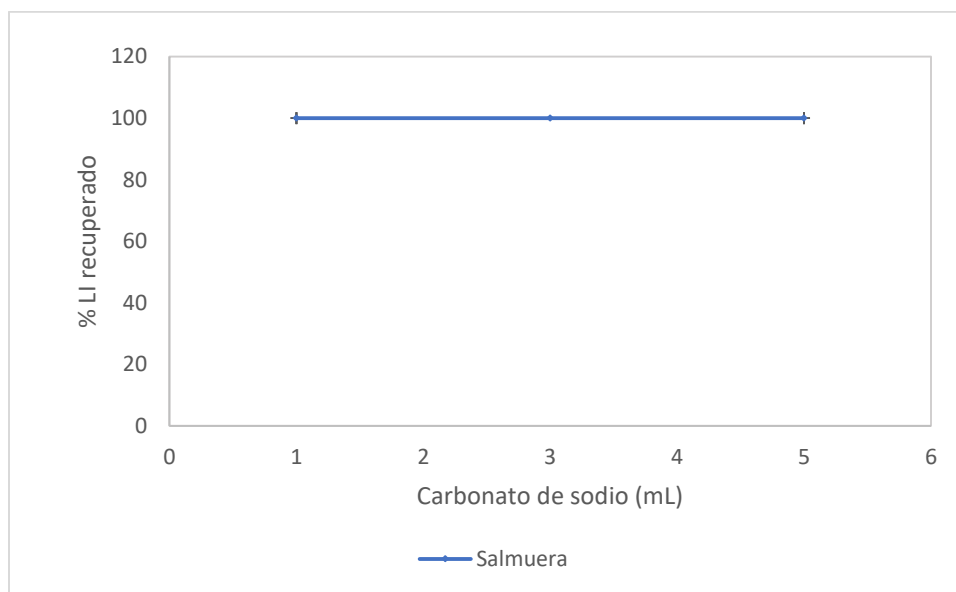


Figura 4.10. Gráfico de % de Li precipitado respecto a la cantidad añadida de carbonato de sodio SrCl<sub>2</sub>+LiCl.

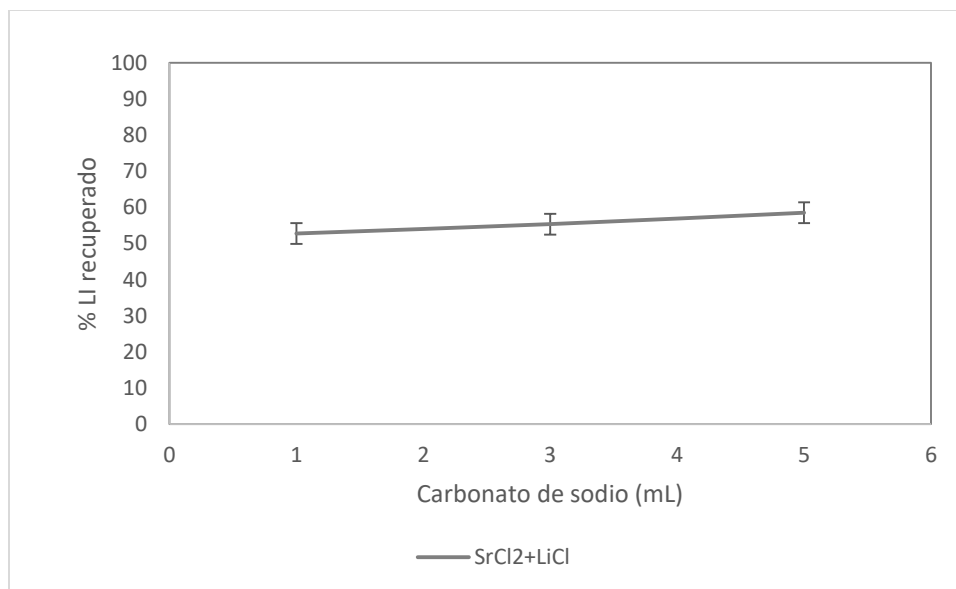


Figura 4.11. Gráfico de % de Li precipitado respecto a la cantidad añadida de carbonato de sodio Salmuera evaporada.

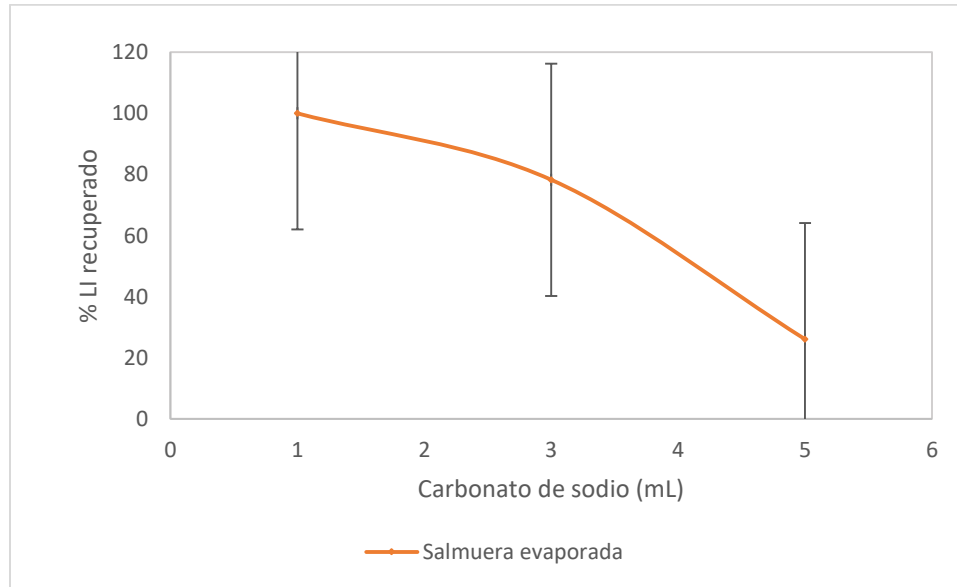


Tabla 4.10. Porcentaje de recuperación de Sr en función de concentración  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (M)

	Concentración de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (M)	% Recuperado
		Sr
Salmuera	0,01	67,53
	0,03	71,43
	0,05	74,68
SrCl <sub>2</sub> +LiCl	0,01	90,25
	0,03	92,35
	0,05	89,50

La recuperación de Sr muestra que su eficiencia varía significativamente según la composición de la solución y la cantidad de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) añadida (Tabla 4.10). En las soluciones de salmuera, la recuperación disminuye ligeramente al aumentar el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , pasando del 74,68 % al 67,53 %. (Al-Absi et al., 2023) destaca cómo los sistemas complejos de salmuera afectan los procesos de recuperación debido a la competencia entre

iones presentes en la solución. Este documento subraya que cationes como  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $K^+$  pueden influir negativamente en la eficiencia de recuperación de Sr debido a su competencia por los sitios de adsorción en los materiales avanzados utilizados en el estudio.

En soluciones puras, como  $SrCl_2+LiCl$ , la recuperación de Sr es notablemente alta, alcanzando un 92,35 % con 0,03 M. Esto sugiere que la ausencia de cationes competidores permite una precipitación más eficiente.

En la figura 4.12 y 4.13 podemos observar los gráficos que nos presentan el porcentaje de estroncio recuperado en función de la cantidad de carbonato añadido para las dos soluciones positivas en dicha recuperación.

Figura 4.12. Porcentaje de estroncio (Sr) recuperado en función de la cantidad de carbonato de sodio añadido en  $SrCl_2 + LiCl$ .

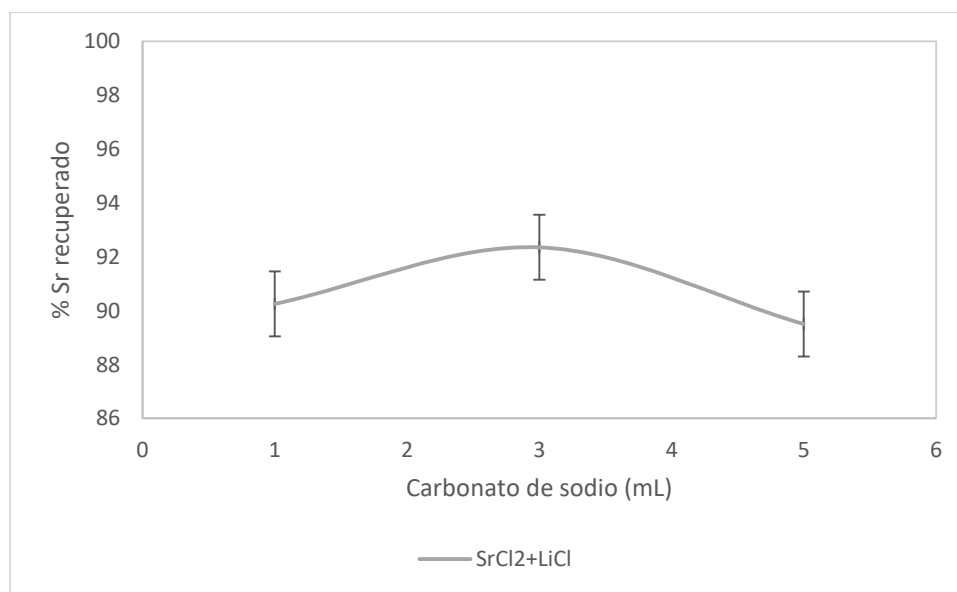
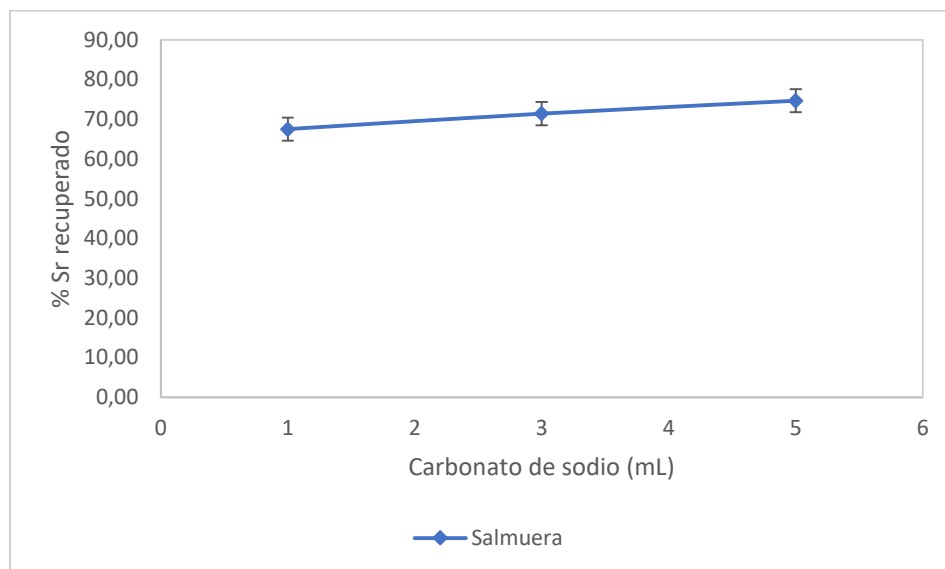
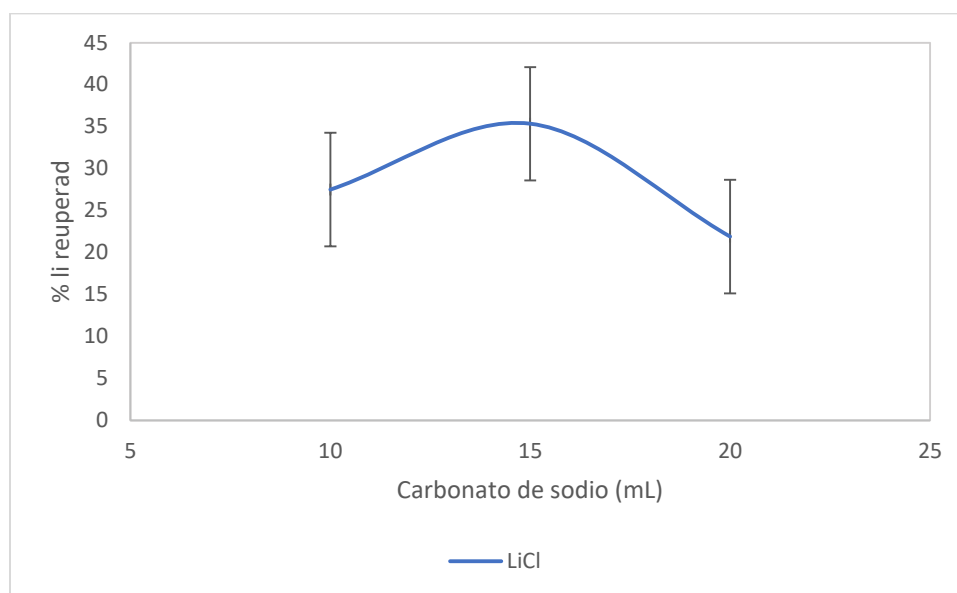


Figura 4.13. Porcentaje de estroncio (Sr) recuperado en función de la cantidad de carbonato de sodio añadido en Salmuera.



El comportamiento parabólico observado en la recuperación de litio con mayores cantidades de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Figura 4.14.), donde la eficiencia disminuye más allá de 0,15 M, puede explicarse por la saturación del sistema y la redisolución de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . (Huangfu et al., 2023) destacan que, en condiciones termodinámicas no óptimas, el equilibrio entre la precipitación y la redisolución puede limitar la eficiencia general del proceso, especialmente en soluciones con alta concentración de aniones competidores. Estos resultados refuerzan la necesidad de controlar estrictamente parámetros como la relación molar, el pH y la temperatura para evitar efectos adversos en la eficiencia de recuperación tanto de Li como de Sr.

Figura 4.14. Gráfico de % litio precipitado respecto a la cantidad añadida de carbonato de sodio para la solución de LiCl.



#### 4.4.2. Cloruro de aluminio hexahidratado.

En esta etapa del estudio, se evaluó la recuperación de litio (Li) y estroncio (Sr) mediante el método de precipitación con cloruro de aluminio ( $\text{AlCl}_3$ ). Los experimentos se realizaron con las dos soluciones seleccionadas, salmuera y  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$ , cuyas condiciones iniciales se detallan en las Tablas 4.1 y 4.2. Los resultados obtenidos se analizaron mediante las técnicas de ICP-OES y AAS.

Los resultados de la Tabla 4.11 muestran que el cloruro de aluminio es altamente eficiente para la recuperación de litio en la salmuera, alcanzando un porcentaje de recuperación máximo de 99.97 % mediante AAS con una dosificación de 0,15 M de  $\text{AlCl}_3$  como se ilustra en la figura 4.15. Este comportamiento refleja un aumento constante en la recuperación del litio a medida que se incrementa la cantidad de reactivo, lo que sugiere que las condiciones experimentales favorecen la formación de compuestos insolubles de litio, optimizando su separación.

En la solución  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$ , el comportamiento es más variable, alcanzando un máximo de 92.10 % con 0,15 M de  $\text{AlCl}_3$ . Sin embargo, en dosis menores o mayores de reactivo, la eficiencia disminuye significativamente, llegando a valores como 62.45 % y 75.42 % de  $\text{AlCl}_3$  (Figura 4.16).

Tabla 4.11. Porcentaje de Li recuperado en comparación con el Cloruro de aluminio añadido a cada solución mediante AAS.

Concentración de $\text{AlCl}_3$ (M)	% Li recuperado	
	Salmuera	$\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$
0,01	96,84	86,11
0,03	99,47	62,45
0,05	99,97	76,05
0,10	99,97	65,90
0,15	99,97	92,10
0,20	99,97	75,42

Figura 4.15. Grafico % recuperación de litio respecto a la cantidad añadida de cloruro de Aluminio por AAS en salmuera de rechazo.

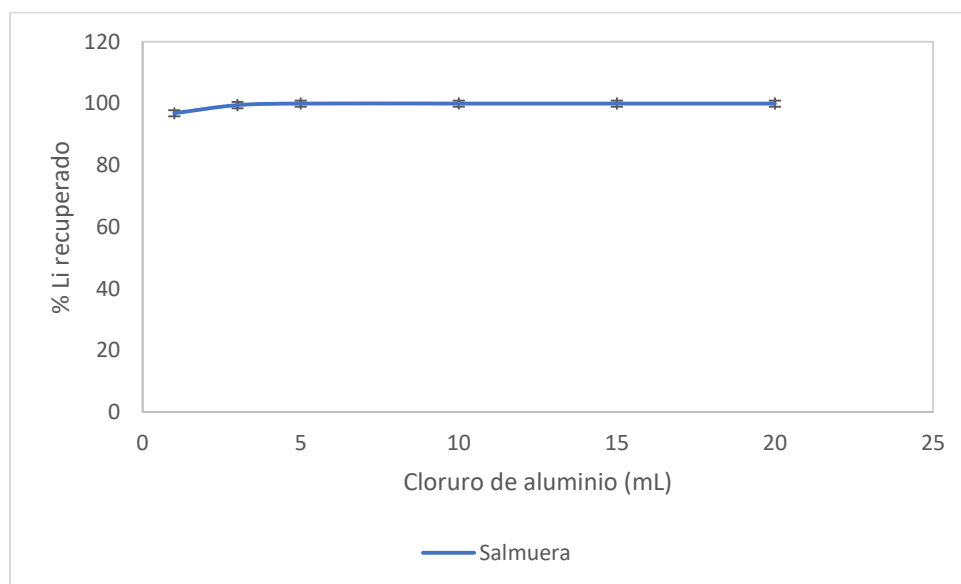
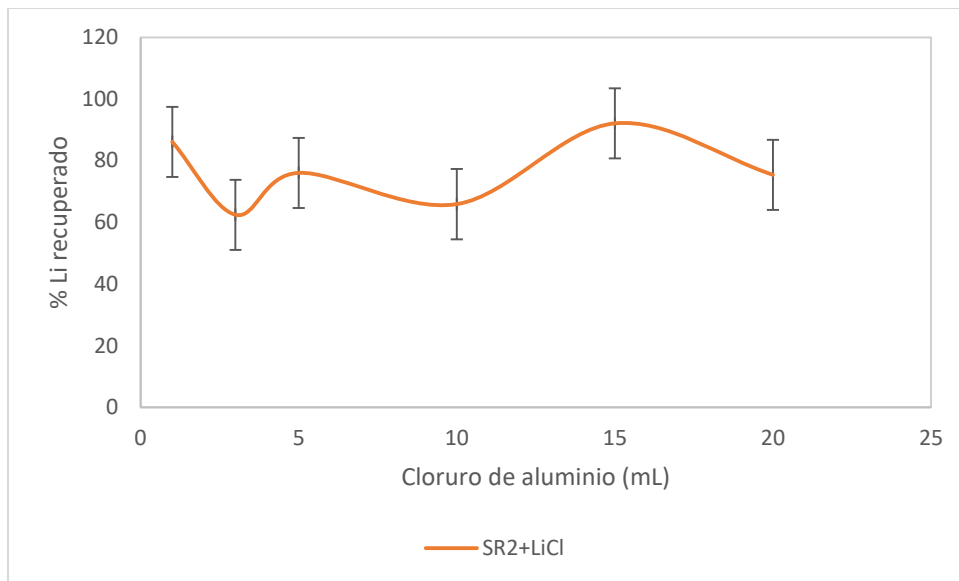


Figura 4.16 Grafico % recuperación de litio respecto a la cantidad añadida de cloruro de Aluminio por AAS en SrCl<sub>2</sub>+LiCl.



La recuperación de estroncio se evaluó exclusivamente mediante ICP-OES, y los resultados se presentan en la Tabla 4.12. En la salmuera, el cloruro de aluminio demostró ser altamente eficiente, logrando una recuperación máxima de 76.62 % de AlCl<sub>3</sub>. Este comportamiento sugiere que el Sr es precipitado eficazmente (Figura 4.17).

En la solución SrCl<sub>2</sub> + LiCl, los resultados muestran una tendencia variable, con un máximo de 80.42 % de AlCl<sub>3</sub> (Figura 4.18).

Tabla 4.12. Porcentaje de Sr recuperado en comparación con el Cloruro de aluminio añadido a cada solución mediante método de ICP-OES.

AlCl <sub>3</sub> (M)	% Sr recuperado	
	Salmuera	SrCl <sub>2</sub> +LiCl
0,01	46,17	70,15
0,03	50,71	38,25
0,05	59,09	46,40
0,10	70,13	68,75
0,15	75,97	76,58
0,20	76,62	80,42

Figura 4.17. Gráfico % recuperación de estroncio respecto a la cantidad añadida de cloruro de aluminio por ICP\_OES salmuera de rechazo.

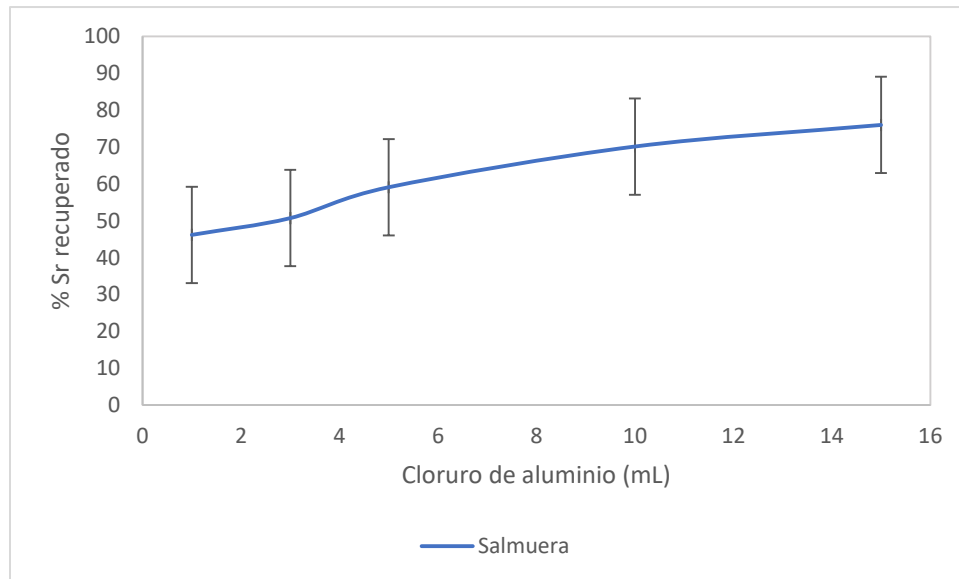
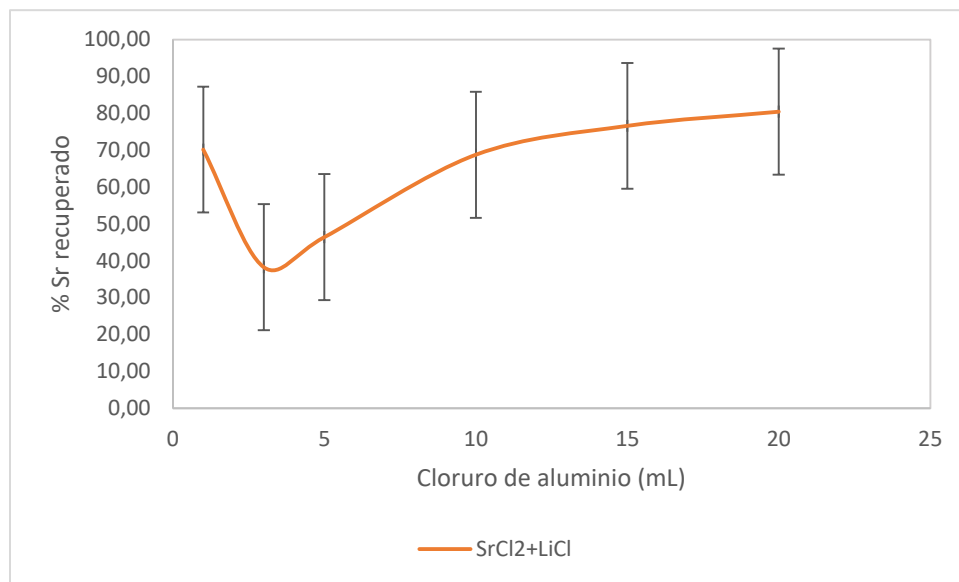


Figura 4.18. Grafico % recuperación de estroncio respecto a la cantidad añadida de cloruro de aluminio por ICP\_OES en SrCl<sub>2</sub>+LiCl.



## 4.5 Ensayos de adsorción.

### 4.5.1. Carbón activado.

En esta etapa del estudio, se evaluó la recuperación de litio (Li) y estroncio (Sr) mediante la adición de diferentes concentraciones de carbón activado a tres soluciones: salmuera, SrCl<sub>2</sub> + LiCl, LiCl y SrCl<sub>2</sub>. Los resultados de litio se midieron utilizando dos técnicas analíticas (ICP-OES y AAS), mientras que el estroncio fue analizado exclusivamente por ICP-OES.

En el caso del litio, los resultados en la salmuera (Tabla 4.13) muestran una recuperación significativamente alta cuando se utilizó AAS, con valores que alcanzaron un máximo del 99.97 % utilizando 1 g/L de carbón activado, Este comportamiento evidencia una alta afinidad del litio por el carbón activado en la salmuera, lo que sugiere que las condiciones de esta son óptimas para su recuperación (Figura 4.19).

Sin embargo, los análisis por ICP-OES mostraron valores negativos, lo cual se considera un error atribuible a las diferencias en los límites de detección y precisión entre ambos métodos. Por esta razón, los resultados obtenidos mediante ICP-OES no se incluyeron en este análisis.

En contraste, en la solución  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$ , la recuperación de litio fue baja, con valores que no superaron el 17.2 % (AAS) incluso con 15 g/L de carbón activado. Esto sugiere que el litio no se adsorbe eficientemente en este sistema y podría estar en mayor proporción en estado disuelto, limitando su recuperación (Figura 4.20).

En la solución de  $\text{LiCl}$ , se observó una baja recuperación de litio, con un mínimo de 1.50 % y un máximo de 14.00 % utilizando las concentraciones iniciales de carbón activado. Sin embargo, debido al incremento gradual en la recuperación de litio observado con mayores concentraciones, se decidió continuar el estudio con esta solución para evaluar su comportamiento al aumentar significativamente la concentración carbón activado (Tabla 4.14). Este enfoque busca analizar si el incremento en la concentración de carbón activado podría mejorar de manera sustancial la recuperación de litio, siguiendo las tendencias observadas en los datos de la tabla anterior (Figura 4.21).

Tabla 4.13. Porcentaje recuperación de litio en comparación de la cantidad añadida de carbón activado analizado por AAS.

Carbón activado (g/l)	% Li recuperado		
	Salmuera	$\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$	$\text{LiCl}$
1	99,97	5,45	3,50
2	94,65	5,65	1,50
5	94,62	4,45	12,40
10	94,74	5,85	14,00
15	99,97	17,2	10,35

Figura 4.19. Gráfico de porcentaje de litio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado. Resultados obtenidos por AAS en salmuera de rechazo.

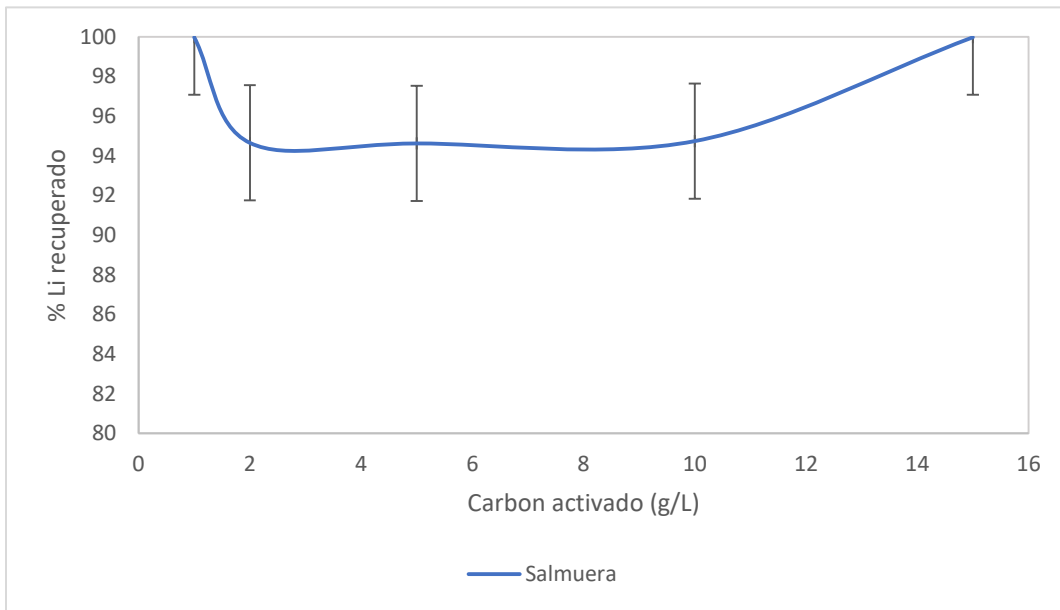


Figura 4.20. Gráfico de porcentaje de litio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado. Resultados obtenidos por AAS en LiCl.

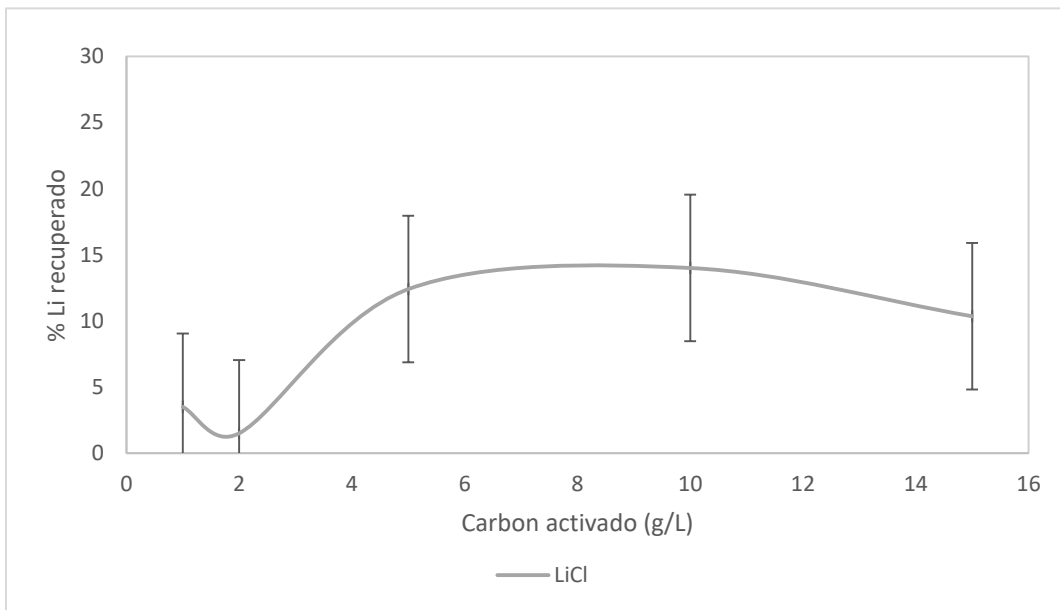
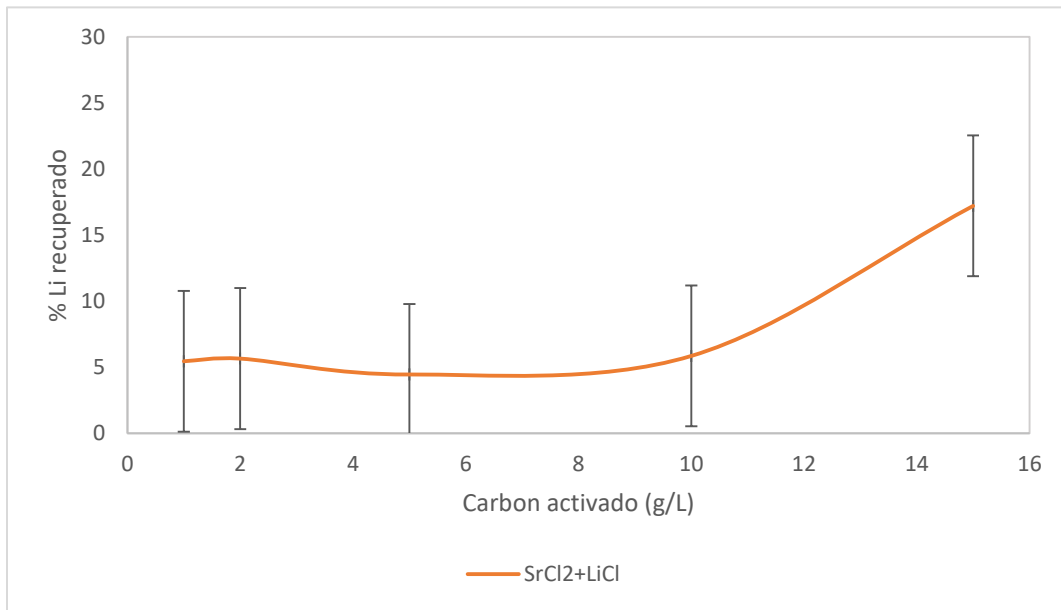


Figura 4.21. Gráfico de porcentaje de litio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado. Resultados obtenidos por AAS en SrCl<sub>2</sub>+LiCl.

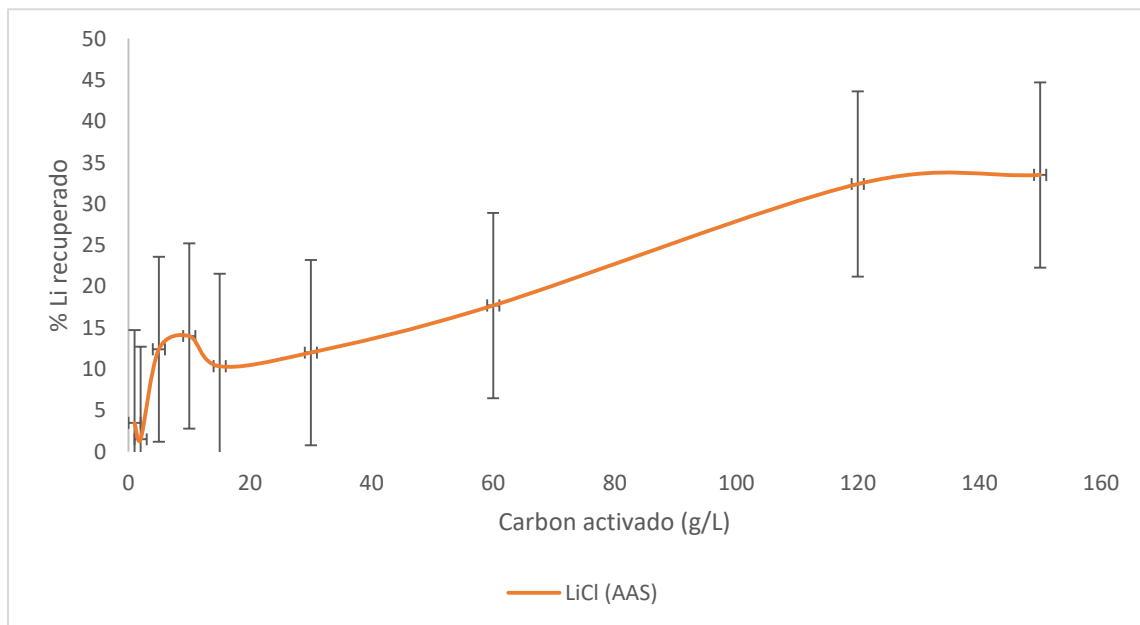


En la solución LiCl, la recuperación de litio mostró una tendencia positiva, aumentando progresivamente con mayores cantidades de carbón activado. A partir de 12 g/L, los valores comenzaron a ser positivos, alcanzando un máximo de 21.2 % (ICP-OES) y 33.5 % (AAS) con 30 g/L de carbón activado. Aunque el litio tiende a recuperarse en este sistema, el proceso requiere una gran cantidad de carbón activado para obtener recuperaciones moderadas, lo que plantea un desafío en términos de eficiencia y costos (Figura 4.22).

Tabla 4.14 Porcentaje recuperación de litio en comparación a la cantidad de carbón activado para la solución de LiCl.

Carbón activado (g/L)	% Li recuperado
	LiCl
1	3,50
2	1,50
5	12,40
10	14,00
15	10,35
30	12,00
60	17,70
120	32,40
150	33,50

Figura 4.22. Gráfico de porcentaje de litio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado para la solución de LiCl por AAS.



El estudio de (Jeong et al., 2015) indica que la recuperación de litio mediante carbón activado modificado químicamente se posiciona como una estrategia eficaz, especialmente bajo tratamientos ácidos y básicos. En el caso del ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), su aplicación incrementó los grupos funcionales ácidos en la superficie del carbón, como los carboxilos, lo que mejoró moderadamente su capacidad de adsorción. Sin embargo, el mayor rendimiento se observó en el tratamiento con hidróxido de potasio (KOH), alcanzando una adsorción máxima del 0.87% en peso con una concentración de 1 mol/L (BAC-1). Esta mejora significativa se atribuye a la introducción de grupos funcionales oxigenados y una mayor carga superficial negativa, que facilitan la interacción electrostática entre el carbón y los iones de litio. Adicionalmente, el tratamiento básico demostró una alta estabilidad en procesos de adsorción-desorción, manteniendo una eficiencia del 89% después de cinco ciclos, lo que refuerza su potencial de reutilización en aplicaciones industriales. Estos resultados destacan la importancia de optimizar tanto la naturaleza del tratamiento químico como las condiciones experimentales para maximizar la eficiencia y viabilidad económica de la recuperación de litio.

En cuanto al estroncio, los resultados en la salmuera mostraron recuperaciones moderadas, alcanzando un máximo del 26.23 % con 15 g/L de carbón activado (Tabla 4.15). En la solución  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$ , la recuperación de Sr fue significativamente mayor, alcanzando un 69.89 % con 15 g/L, lo que sugiere una mayor afinidad del carbón activado por el Sr en este medio. Por el contrario, en la solución de  $\text{SrCl}_2$ , los resultados fueron intermedios, con un máximo del 54.5 % a 5 g/L, pero disminuyeron con mayores cantidades de carbón activado esto se puede ver reflejado en las figuras 4.23, 4.24 y 4.25.

Tabla 4.15. Porcentaje recuperación de estroncio en comparación de la cantidad añadida de carbón activado por ICP-OES.

Carbón activado (g/L)	% Sr recuperado		
	Salmuera	SrCl <sub>2</sub> +LiCl	SrCl <sub>2</sub>
1	25,19	34,3	32
2	23,41	39	34,95
5	24,67	43	54,5
10	25,71	50,5	46,5
15	26,23	69,89	48,45

Figura 4.23. Gráfico de porcentaje de estroncio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado en salmuera de rechazo.

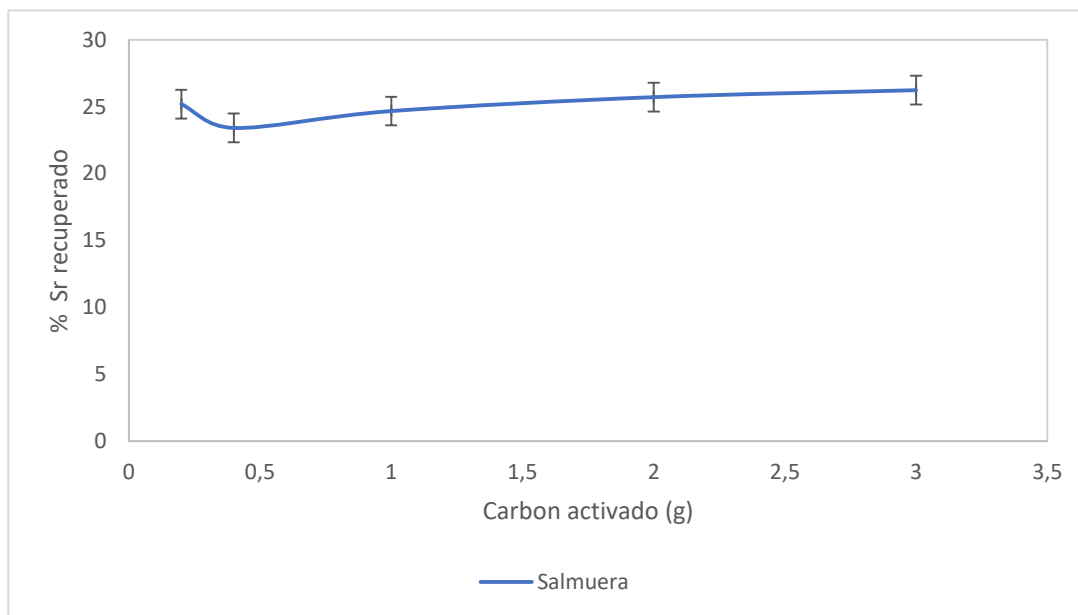


Figura 4.24. Grafico de porcentaje de estroncio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado en salmuera de rechazo en SrCl<sub>2</sub>.

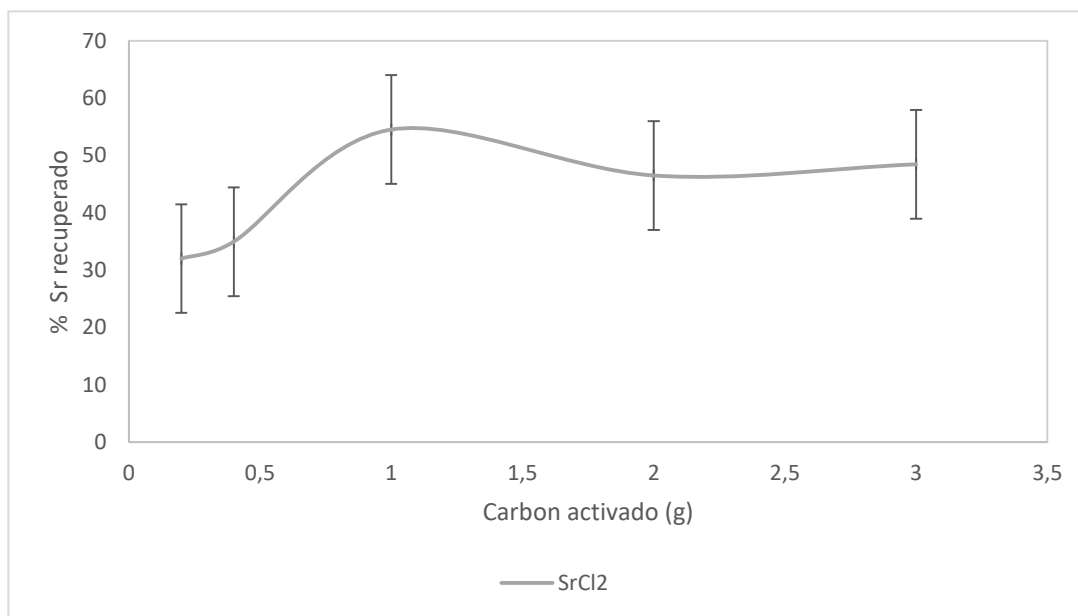
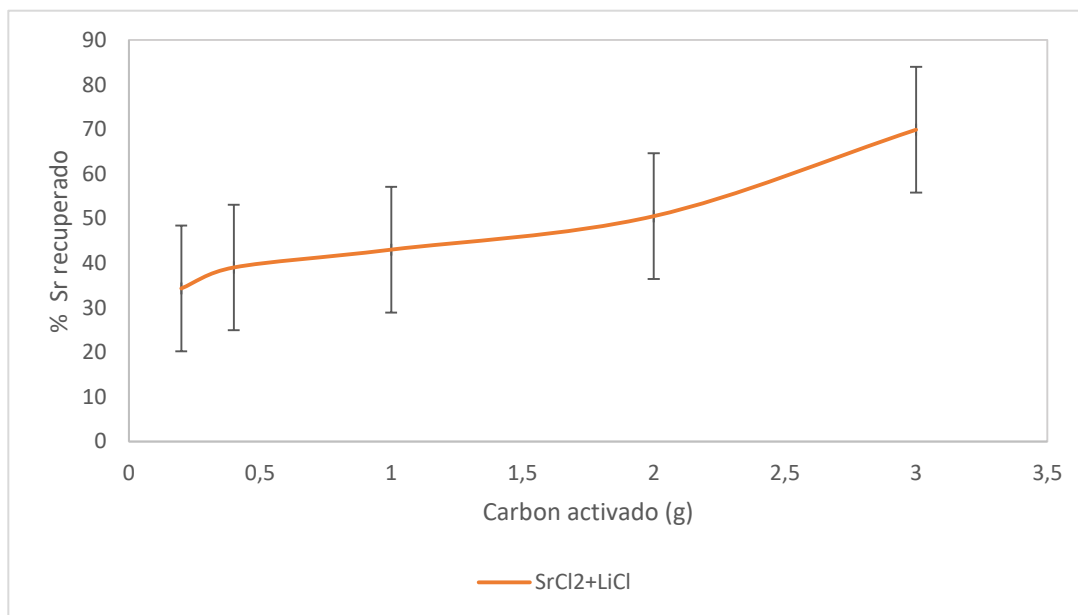


Figura 4.25. Gráfico de porcentaje de estroncio recuperado con la cantidad añadida de carbón activado en salmuera de rechazo en SrCl<sub>2</sub> +LiCl.



Estos resultados evidencian que el carbón activado tiene una afinidad limitada por el estroncio en la salmuera y una afinidad significativamente mayor en la solución  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$ , destacando la influencia del medio en el desempeño del material.

#### **4.2.5. Resina de intercambio iónico 1 (Lewatit Mono Plus TP-214).**

Para la Resina 1, se trabajó con dos soluciones: salmuera y  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$ , ambas preparadas bajo las condiciones iniciales descritas en las Tablas 4.1 y 4.2. A partir de los resultados obtenidos, se determinó que los datos de recuperación de litio analizados mediante ICP-OES presentaron inconsistencias significativas, lo que llevó a priorizar los análisis obtenidos mediante el método AAS debido a su mayor confiabilidad.

En el caso de la solución  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$ , los resultados indicaron una recuperación negativa de litio con ambas técnicas analíticas, lo que sugiere que este método no es viable para la extracción de litio en este tipo de matrices. Este comportamiento podría estar relacionado con la composición química de la solución, la cual podría dificultar la adsorción del litio en los sitios activos de la Resina 1. Esto resalta la necesidad de optimizar las condiciones experimentales para mejorar la eficiencia del proceso en soluciones más complejas.

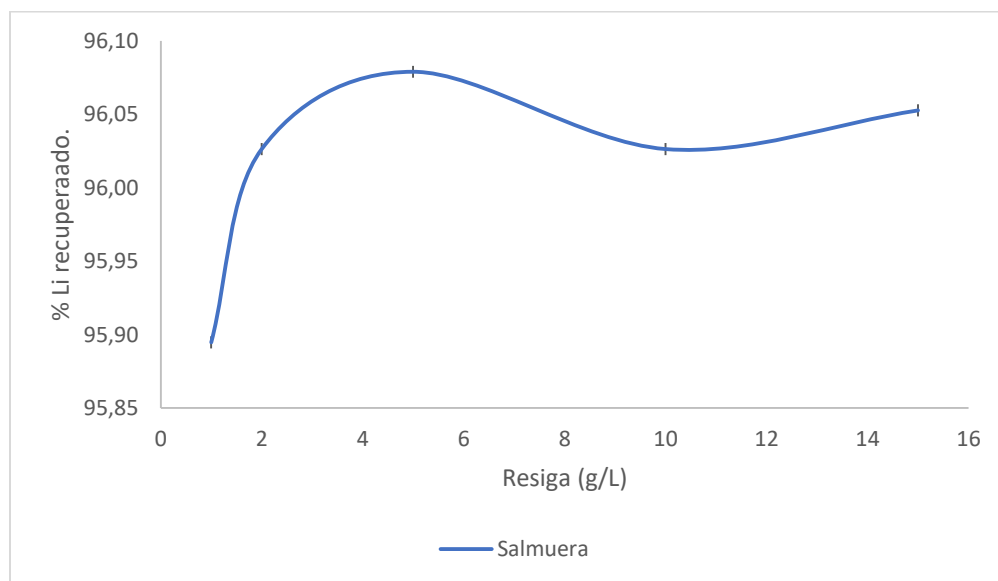
Por el contrario, en la salmuera, la recuperación de litio fue alta y consistente, alcanzando un máximo de 96.08 % con 5 g/L de resina, según los datos obtenidos por AAS (Tabla 4.16). A medida que se incrementó la cantidad de resina, la recuperación se estabilizó, lo que indica que la Resina 1 posee una alta afinidad por el litio en esta matriz. Este comportamiento sugiere que la composición química de la salmuera genera condiciones más favorables para la adsorción del litio en comparación con la solución  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$  (Figura 4.26).

Las diferencias observadas en los resultados podrían deberse a errores en el método de análisis, lo que resalta la importancia de realizar una evaluación rigurosa de las técnicas empleadas para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.

Tabla 4.16. Recuperación de Li en la salmuera mediante la cantidad añadida de resina.

Resina (1) (g/L)	% Li recuperado
	Salmuera
1	95,89
2	96,03
5	96,08
10	96,03
15	96,05

Figura 4.26. Gráfico de porcentaje de litio recuperado mediante la cantidad añadida de resina 1 en la salmuera mediante AAS.



El análisis de la recuperación de estroncio (Sr) se llevó a cabo exclusivamente mediante la técnica de ICP-OES. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento variable dependiendo de la matriz utilizada, destacando diferencias importantes entre la salmuera y la solución  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$ .

En la salmuera, los resultados indican una recuperación moderada de Sr (Tabla 4.17), con una tendencia ligeramente positiva al incrementar la cantidad de resina utilizada. La recuperación máxima alcanzada fue del 25.06 % con 1 g/L de resina, disminuyendo levemente a 23.38 % al utilizar 15 g/L. Este comportamiento sugiere que la Resina 1 tiene una afinidad limitada pero estable por el Sr en este sistema, donde el incremento de la

cantidad de resina no resulta en mejoras significativas. La estabilidad en los valores de recuperación podría atribuirse a la rápida saturación de los sitios activos de la resina y a la composición química de la salmuera.

Por otro lado, en la solución de  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$ , los resultados muestran recuperaciones consistentemente bajas, con un rango que varía entre 18.40 % y 20.65 % para concentraciones de resina entre 1 g/L y 15 g/L. Este comportamiento indica que la Resina 1 no es adecuada para la recuperación de Sr en esta matriz, probablemente a posibles efectos de interferencia química en la solución.

Tabla 4.17. Recuperación de Sr mediante la cantidad añadida de resina.

Resina (1)(g/L)	% Sr Recuperado	
	Salmuera	$\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$
1	25,06	19,00
2	23,77	18,55
5	24,94	18,70
10	24,03	20,65
15	23,38	18,40

El gráfico de recuperación (Figura 4.27) refleja claramente estas tendencias, destacando la mayor eficiencia de la Resina 1 en la salmuera en comparación con la solución de  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$  (Figura 4.28). Mientras que en la salmuera se observa una recuperación moderada y constante, los valores obtenidos en la solución de  $\text{SrCl}_2 + \text{LiCl}$  permanecen bajos.

Figura 4.27. Gráfico de porcentaje de estroncio recuperado mediante la cantidad añadida de resina 1 mediante ICP-OES en salmuera de rechazo.

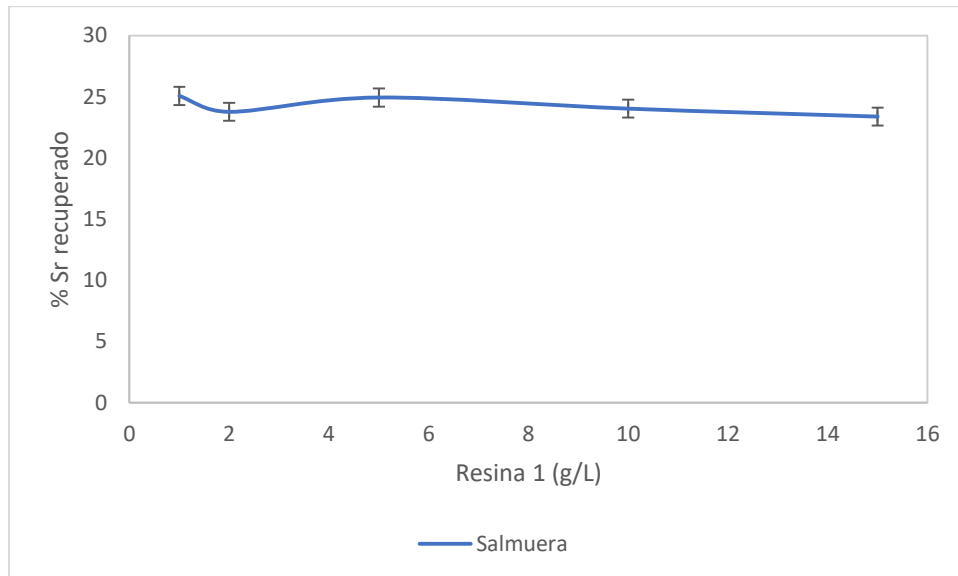
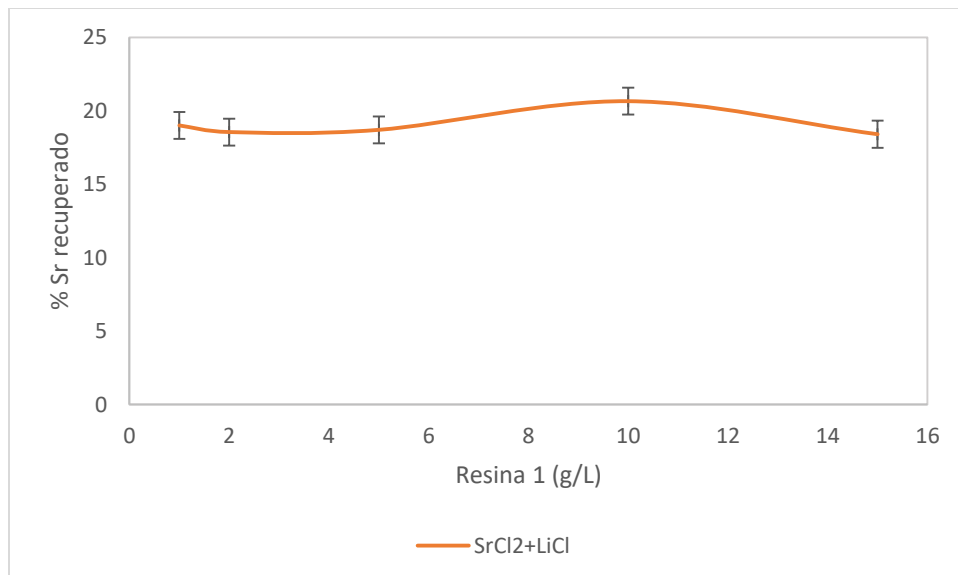


Figura 4.28. Gráfico de porcentaje de estroncio recuperado mediante la cantidad añadida de resina 1 mediante ICP-OES en SrCl<sub>2</sub>+LiCl.



#### **4.2.6. Resina de intercambio iónico 2 (base aluminio).**

El uso de la Resina 2, diseñada específicamente para la recuperación de litio y con una composición inicial de litio y aluminio diferente a la Resina 1, evidencia un comportamiento diferenciado tanto en salmuera como en solución de LiCl. A continuación, se presenta un análisis detallado de los datos obtenidos.+

La Tabla 4.18 muestra la relación entre la cantidad de resina añadida y el porcentaje de litio recuperado en salmuera y solución de LiCl mediante el método de AAS con una condición inicial vistas anteriormente en la tabla 4.1 y 4.2. En salmuera, al utilizar 0.4 g de resina, se alcanzó una recuperación máxima del 75.78 %, lo que demuestra un desempeño eficiente en condiciones iniciales. Sin embargo, al aumentar la cantidad de resina a 1 g, la recuperación disminuyó significativamente al 51.315 %, reflejando una reducción importante en la capacidad de adsorción. Esta tendencia continúa con 10 (g/l) de resina, donde la recuperación de litio se reduce aún más al 30.526 %.

En la solución de LiCl se observa un comportamiento similar. Inicialmente, con 2 (g/l) de resina, se obtuvo una recuperación del 46.069 %, pero a medida que se incrementa la cantidad de resina a 10 (g/l), la eficiencia de adsorción disminuye drásticamente, alcanzando solo un 5.27 % de recuperación de litio.

En línea con estos resultados, (Resinas de intercambio iónico (s.f.)) menciona que la eficiencia de las resinas de intercambio iónico puede verse afectada por la rápida saturación de los sitios activos, lo que restringe su capacidad de adsorción en soluciones con alta concentración de contaminantes. Además, destaca factores clave que influyen en su desempeño, como el pH, la concentración de aniones presentes en el medio y la saturación de los sitios activos previamente mencionada.

Se llevó a cabo un análisis complementario de los resultados utilizando el método ICP-OES para la determinación de litio. Sin embargo, este método mostró valores negativos en comparación con los obtenidos mediante AAS, por lo que dichos resultados no fueron

considerados en este estudio. Esta discrepancia podría atribuirse a un porcentaje de error inherente entre ambos métodos, que varía entre un 5 % y un 20 %, así como a las diferencias en los límites de detección de los equipos utilizados

Tabla 4.18. Recuperación de litio mediante la cantidad añadida de resina 2.

Resina 2 (g/l)	% recuperado (AAS)	
	Salmuera	Li (AAS)
2	75,78	46,069
5	51,315	19,522
10	30,526	5,27

En la figura 4.29 y 4.30 podemos observar la tendencia mencionada anteriormente.

Figura 4.29. Gráfico de porcentaje recuperación de Li respecto a la cantidad añadida de resina 2 por AAS.

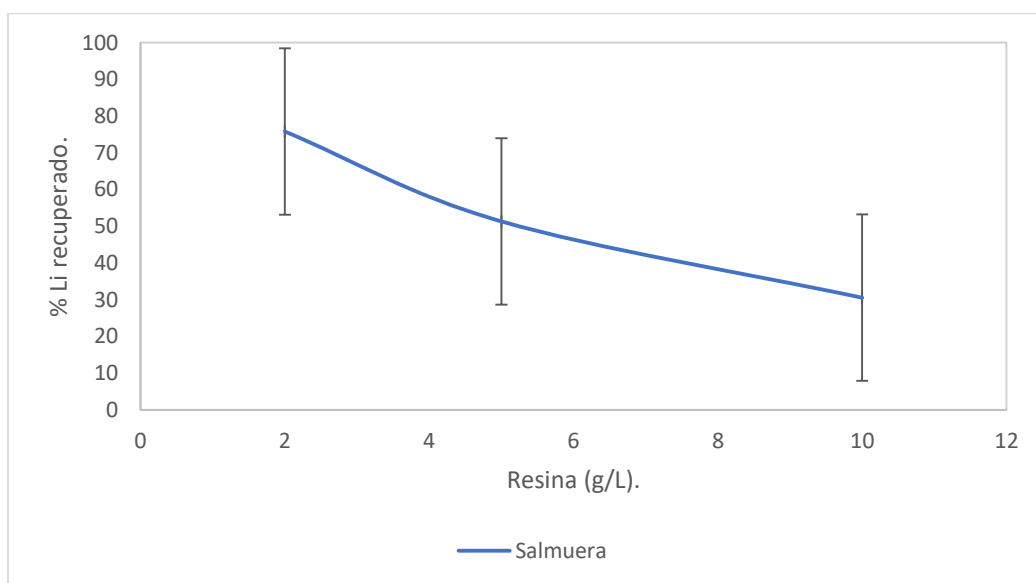
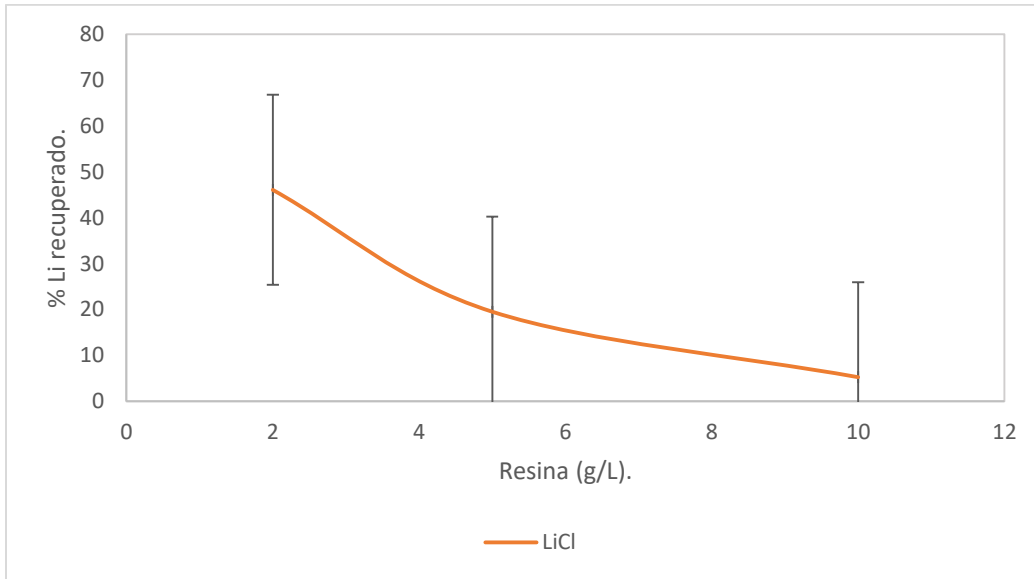


Figura 4.30. Gráfico de porcentaje recuperación de Li respecto a la cantidad añadida de resina 2 por AAS en LiCl.

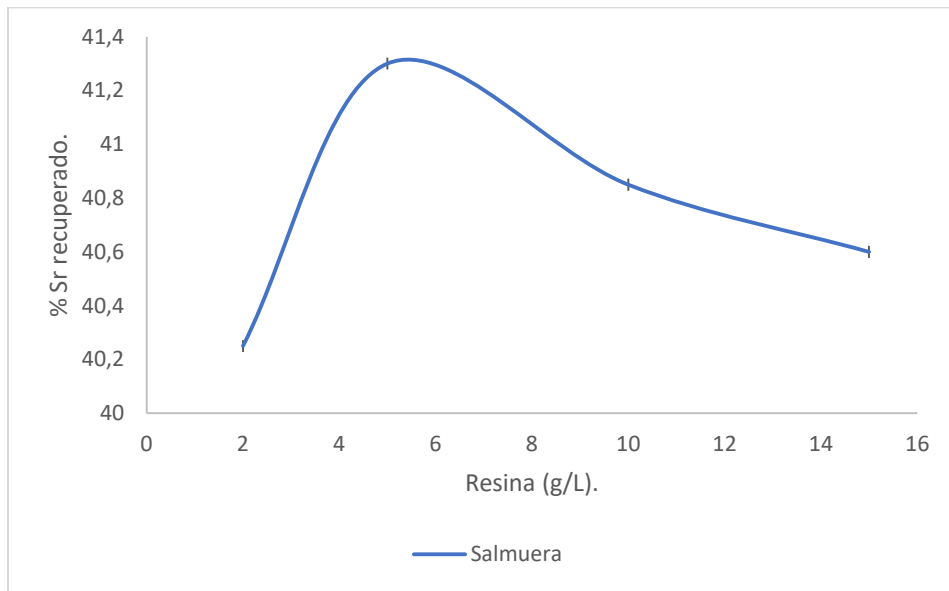


En el análisis de la recuperación de estroncio (Sr) en la salmuera (Tabla 4.19.), los resultados muestran valores consistentes y moderados, que se mantienen en un rango estrecho entre 40.25 % y 40,85 %, independientemente de la cantidad de resina utilizada. Este comportamiento indica que la Resina 2 posee una afinidad limitada pero estable por el estroncio en este tipo de solución (Figura4.31). Además, la falta de variaciones significativas con el incremento de la resina sugiere que los sitios activos de la resina se saturan rápidamente o que su capacidad de adsorción para el estroncio alcanza un límite definido en estas condiciones como menciona (Resinas de intercambio iónico, s.f.).

Tabla 4.19. Recuperación de estroncio mediante la cantidad añadida de resina 2.

Resina 2 (g/L)	% Sr recuperado
	Salmuera
2	40,25
5	41,3
10	40,85
15	40,6

Figura 4.31. Gráfico de porcentaje recuperación de Sr respecto a la cantidad añadida de resina 2 en salmuera de rechazo.



## **5 CAPITULO V CONCLUSIONES.**

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que es posible recuperar iones metálicos valiosos, como el litio y el estroncio, a partir de salmueras de rechazo generadas por plantas de ósmosis inversa.

En primer lugar, la caracterización de la salmuera permitió identificar concentraciones significativas de sodio, magnesio, calcio y potasio, además de niveles menores pero relevantes de litio (3,8 mg/L) y estroncio (15,4 mg/L), lo cual confirma su potencial como fuente secundaria de metales estratégicos.

En segundo lugar, mediante técnicas de precipitación química se logró remover selectivamente los cationes mayoritarios, enriqueciendo así la solución en litio y estroncio. Particularmente, el uso de carbonato de sodio permitió alcanzar recuperaciones superiores al 99,97 % para el litio y 76,62 % para el estroncio en condiciones óptimas.

En tercer lugar, los ensayos de adsorción con carbón activado mostraron una recuperación máxima de litio del 33,5 % al utilizar una concentración de 30 g/L en soluciones simples. Sin embargo, esta técnica demostró una eficiencia limitada en matrices complejas y requirió elevadas dosis de adsorbente para obtener resultados moderados.

En cuarto lugar, los ensayos con resinas de intercambio iónico demostraron una mayor eficiencia y selectividad, alcanzando valores de recuperación superiores al 80 % tanto para el litio como para el estroncio, en soluciones reales y sintéticas.

Finalmente, se observó una limitación importante relacionada con la caracterización de los productos sólidos obtenidos, ya que no se logró confirmar con certeza la pureza de los compuestos formados ni la especificidad de los iones adsorbidos o intercambiados. Esto evidencia la necesidad de aplicar técnicas analíticas más avanzadas en estudios futuros.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica de aplicar metodologías como la precipitación química y la adsorción/intercambio iónico para valorizar salmueras

industriales, permitiendo reducir su impacto ambiental y generar nuevas oportunidades de aprovechamiento económico a partir de residuos.

## 6 Bibliografía.

¿Qué es y cómo funciona un microscopio electrónico de barrido? (s. f.).

<https://www.blog.metalinspec.com.mx/que-es-y-como-funciona-un-microscopio-electronico-de-barrido>

(N.d.). Researchgate.net. Retrieved October 15, 2023, from

[https://www.researchgate.net/publication/361756971\\_Material\\_extraction\\_potential\\_of\\_desalination\\_brines\\_A\\_technical\\_and\\_economic\\_evaluation\\_of\\_brines\\_as\\_a\\_possible\\_new\\_material\\_source](https://www.researchgate.net/publication/361756971_Material_extraction_potential_of_desalination_brines_A_technical_and_economic_evaluation_of_brines_as_a_possible_new_material_source)

Ahumada, Z., & Andrés, S. (n.d.). PLANTA DE OSMOSIS INVERSA. Usm.Cl. Retrieved

October 16, 2023, from

<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/46100/3560901064280UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Al-Absi, R. S., Khan, M., Abu-Dieyh, M. H., Ben-Hamadou, R., Nasser, M. S., & Al-

Ghouti, M. A. (2023). The recovery of strontium ions from seawater reverse osmosis brine

using novel composite materials of ferrocyanides modified roasted date pits. *Chemosphere*,

311, 137043. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137043>

Alternativas de extracción de litio para salmueras sqm salar. (2018, Noviembre).

[http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/3595/4/tesis\\_Alternativas\\_de\\_extraccion\\_de\\_litio](http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/3595/4/tesis_Alternativas_de_extraccion_de_litio)

[.Image.Marked.pdf](#)

Arroyo, F., et al. (2019). Lithium recovery from desalination brines using specific ion-

exchange resins. *Desalination*, 468, 114073. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114073>

Baeza, E., & Harris, P. (n.d.). La desalinización de agua de mar: tecnologías, regulaciones y

ambientales. Bcn.Cl. Retrieved October 16, 2023, from

[https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27769/2/Informe\\_Aspectos\\_Principales\\_de\\_Desalacion.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27769/2/Informe_Aspectos_Principales_de_Desalacion.pdf)

Baraja, MC (1992). selección y diseño de un equipo de intercambio iónico a escala de banca . Instituto Politécnico Nacional.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2023). Científicos de Australia y Corea explican impacto de la desalinización en los ecosistemas marinos - Programa Asia Pacifico. <https://www.bcn.cl/observatorio/asiapacifico/noticias/efectos-desalinizacion-ecosistemas-marinos-ciencia>

Bonin, L., Deduytsche, D., Wolthers, M., Flexer, V., & Rabaey, K. (2021). Boron extraction using selective ion exchange resins enables effective magnesium recovery from lithium rich brines with minimal lithium loss. *Separation and Purification Technology*, 275(119177), 119177. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119177>

Boro. (2019, October 18). Clickmica. <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/elementos-quimicos/boro/>

Claves del litio: el metal más liviano y con mayor potencial electroquímico. (2022, January 18). Uchile.cl. <https://uchile.cl/noticias/183640/el-potencial-de-chile-con-el-litio-que-es-y-para-que-sirve->

Crespo, P., Palma, H., Quintana, J., & Quispe, L. (1985). *Traitement des eaux et des saumures: Principes et applications*. Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Recuperado de [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers08-01/24717.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers08-01/24717.pdf)

David. (2016, June 28). Modificadores y La Química De Flotacion. Foro por Metalurgista de 911Metallurgist. <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/modificadores-y-la-quimica-de-flotacion/>

Deb, A. K. S., et al. (2022). Efficient separation of strontium ions from aqueous solution by dibenzo-18-crown-6 functionalized resin: Static and dynamic adsorption studies with

computational DFT insights. *Chemical Engineering Journal Advances*, 11, 100308.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100308>

EcuRed. (s. f.). *Picnómetro - ECURED*. <https://www.ecured.cu/Picn%C3%B3metro>  
Efficient separation of strontium ions from aqueous solution by CMPS-DB18C6 resins.  
(2022). *Chemical Engineering Research and Design*, 180, 65–75.  
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.06.001>

el p H, ¿qué es. (s/f). *Folleto Informativo pH*. Waterboards.ca.gov.  
[https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf)

Eng. 185 (2022), 107652, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107652>.

*Espectroscopia de absorción atómica*.

<https://www.carburos.com/applications/atomic-absorption-spectroscopy#:~:text=La%20espectroscopia%20de%20absorci%C3%B3n%20at%C3%B3mica,concentraci%C3%B3n%20de%20un%20componente%20espec%C3%ADfico>.

Flores, H. R., Valdez, S. K., & Orce, A. M. (2018). Recuperación de hidróxido de magnesio en salmueras de la Puna argentina. *Minería y Geología*, 34(2), 210-222.

Fontana, D., Forte, F., Pietrantonio, M., Pucciarmati, S., & Marcoaldi, C. (2022). Magnesium recovery from seawater desalination brines: a technical review. *Environment Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02663-2>

González-Partida, E., Camprubí, A., Canet, C., & González-Sánchez, F. (2008). Físicoquímica de salmueras e hidrocarburos en cuencas petroleras y en depósitos minerales tipo Mississippi Valley y asociados. Parte I: temperatura, presión y composición de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 60(1), 11-22.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222008000100002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222008000100002)

Harvie, C. E., Møller, N., & Weare, J. H. (1984). *The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO<sub>4</sub>-OH-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system to high ionic strengths at 25 °C*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(4), 723-751.

Heidari, N., & Momeni, P. (2017). Selective adsorption of lithium ions from Urmia Lake onto aluminum hydroxide. *Environmental Earth Sciences*, 76(16), 551.

[http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/3595/4/tesis\\_Alternativas\\_de\\_extraccion\\_de\\_litio\\_Image.Marked.pdf](http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/3595/4/tesis_Alternativas_de_extraccion_de_litio_Image.Marked.pdf)

<https://mapeko.org/recursos/desalinizacion-del-agua-de-mar-en-chile/>

Ihsanullah, I., Mustafa, J., Zafar, A. M., Obaid, M., Atieh, M. A., & Ghaffour, N. (2022). Waste to wealth: A critical analysis of resource recovery from desalination brine. *Desalination*, 543, 116093. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116093>

Jiménez Heinert, M., Grijalva Endara, A., & Ponce Solórzano, H. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *RECIMUNDO*, 4(4), 4-12. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.4-12](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.4-12)

Kołodzyńska, D., Krukowska-Bąk, J., Kazmierczak-Razna, J., & Pietrzak, R. (2017). Uptake of heavy metal ions from aqueous solutions by sorbents obtained from the spent ion exchange resins. *Microporous and Mesoporous Materials: The Official Journal of the International Zeolite Association*, 244, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.02.040>

Kumar A., Naidu G., Fukuda H., Du F., Vigneswaran S., Drioli E., Lienhard J.H., Metals recovery from seawater desalination brines: technologies, opportunities, and challenges, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 9 (2021) 7704–7712. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c00785>.

Lehmann O., Nir O., Kuflik M., Lahav O. Recovery of high-purity magnesium solutions from RO brines by adsorption of Mg(OH)<sub>2</sub> (s) on Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> micro-particles and magnetic solids separation, *Chem. Eng. J.* 235 (2014) 37–45.

Li, R., Wang, Y., Duan, W., Du, C., Tian, S., Ren, Z., & Zhou, Z. (2023). Selective extraction of lithium ions from salt lake brines using a tributyl phosphate-sodium tetraphenyl boron-phenethyl isobutyrate system. *Desalination*, 555(116543), 116543. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116543>

Li, S., Kang, L., Liu, J., Wang, J., Ren, X., & Meng, Y. (2016). Research on distribution and extraction technology of lithium resources. *Guangdong Chem./Indust.*, 43, 81-82.

Loganathan P., Naidu G., Vigneswaran S., Mining valuable minerals from seawater: a critical review, *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 3 (2017) 37–53, <https://doi.org/10.1039/C6EW00268D>.

López, V. L., Schalamuk, B. I., & Azarevich, M. B. (2021). Depósitos de litio y potasio en salmueras de salares de Sudamérica: caracterización, hidroquímica, depocentros y recursos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 34(2), 129-144. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/173725>

Los Sólidos se Encuentran en, la N. en F. D. L. S. D. *¿Qué es la conductividad eléctrica/salinidad?* Waterboards.ca.gov. [https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf)

Lundaev V., Solomon AA., Caldera U., Breyer C., Material extraction potential of desalination brines: a technical and economic evaluation of brines as a possible new material source, *Miner.*

Magnesio: propiedades, usos, características y ejemplos. (n.d.). Retrieved October 16, 2023, from <https://humanidades.com/magnesio/>

Minería de salmuera: la recuperación de minerales en la desalación de agua. (2022, October 26). AEDyR; Asociación Española de Desalación y Reutilización de Agua (AEDyR). <https://aedyr.com/mineria-salmuera-recuperacion-minerales-desalacion-agua/>

Operaciones Básicas en el Laboratorio de Química. Precipitación. Fundamento de la Técnica. (n.d.). Www.ub.edu. Retrieved October 17, 2023, from [https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/precipitacio\\_fonament.html](https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/precipitacio_fonament.html)

Precipitation Química. (n.d.). Edu.Pe. Retrieved October 17, 2023, from [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v05\\_n9/preci\\_quimi.htm](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v05_n9/preci_quimi.htm)

Propiedades del Níquel y sus Aleaciones. (n.d.). Ingemecanica.com. Retrieved October 16, 2023, from <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn109.html>

Pueyo, J. J., Chong, G., & Jensen, A. (1999). Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamara, Chile. Revista Geológica de Chile, 26(1), 89–108. [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0716-02081999000100005&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0716-02081999000100005&script=sci_arttext)

Purificación de salmueras - Procesamiento de cloruro de sodio. Recuperado de <https://1library.co/article/purificaci%C3%B3n-salmueras-procesamiento-cloruro-sodio.zgweo98y>

Resumen de Salud Pública: Estroncio (Strontium). (2021, January 26). Cdc.gov. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs159.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs159.html)

Rodríguez, N., & Velasco Hurtado, C. (n.d.). Revista Metalúrgica UTO. Revista Metalúrgica UTO, 29. Retrieved October 17, 2023, from [http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2078-55932005000100005&lng=en&nrm=iso](http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932005000100005&lng=en&nrm=iso)

Rojo, N., Insausti, A., Elías, A., Barona, A., Meaurio, E., & Ibarra, G. (2003). Caracterización de la salmuera del Valle Salado de Salinas de Añana (Álava). Alternativas de recuperación del valle. Ingeniería Química y del Medio Ambiente, Universidad del País Vasco.

Rubidio. (2020, December 15). ConceptoABC. <https://conceptoabc.com/rubidio/>  
Solvent extraction of strontium and cesium from brine solutions using MIBK. (2022).  
Separation and Purification Technology, 295, 121812.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121812>

Soto, K., Akama, Y. y Nakai, T. (1984). EXTRACCIÓN SOLVENTE DE CALCIO(II) Y ESTRONCIO(I) CON 1-FENIL-3-METIL-CIL-5-PIRAZOLONA. Poliedro , 4  
TecnoConverting. (2024, 26 septiembre). *¿Que es la NTU? - TecnoConverting Engineering*.  
TecnoConverting Engineering. <https://www.tecnoconverting.es/articulos-tecnicos/que-es-la-ntu/>

Tecnologías de litio para la industria farmacéutica. (2018, September 25). Livent.  
<https://livent.com/es/market-products/pharmaceuticals-agrochemical/>

Torres Fernández, C. S. (2024). *Adsorción de metales pesados en agua usando carbón activado modificado mediante tratamiento ácido*. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química.

Trujillo, Y. R. (2023, March 26). Cristalización de aguas industriales mediante evaporación. Ingeniería Mecánica Industrial. <https://esingenieria.pro/cristalizacion-de-aguas-industriales-mediante-evaporacion/>

Uranio (Uranium). (2021, January 25). Cdc.gov.  
[https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts150.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts150.html)

Xie, J., Li, K., Shi, Z., Min, C., Li, S., Yin, Z., & Ma, R. (2023). Separation of Cesium and Rubidium from Solution with High Concentrations of Potassium and Sodium. *Separations*, 10(1), 42. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/separations10010042>

Xu, Z., Wang, X., & Sun, S. (2022). Performance of a synthetic resin for lithium adsorption in waste liquid of extracting aluminum from fly-ash. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 44, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.03.036>

Yi, W.-T., Yan, C.-Y., & Ma, P.-H. (2009). Removal of calcium and magnesium from  $\text{LiHCO}_3$  solutions for preparation of high-purity  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  by ion-exchange resin. *Desalination*, 249(2), 729–735. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.034>

Zhang, Y., Hua, Y., Wang, L., & Sun, W. (2019). Systematic review of lithium extraction from salt-lake brines via precipitation approaches. *Minerals Engineering*, 139, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105868>

Resinas de intercambio iónico: Métodos de eliminación de nitratos en el agua. Recuperado de <https://1library.co/article/resinas-intercambio-m%C3%A9todos-eliminaci%C3%B3n-nitratos-agua.qo5eno30>

Devore, J. L. (2011). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (7ª ed.). Cengage Learning.

Choi, Y., Naidu, G., Lee, S., & Vigneswaran, S. (2020). Recovery of sodium sulfate from seawater brine using fractional submerged membrane distillation crystallizer. *Chemosphere*, 238, 124641. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124641>

Rojas, H. A., Guerrero, D. C., Vásquez, O. Y., & Valencia, J. S. (2012). Aplicación del modelo de Bohart y Adams en la remoción de mercurio de drenajes de minería por adsorción con carbón activado. *Información Tecnológica*, 23(3), 21-32. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000300004>

Jiménez Heinert, M. E., Grijalva Endara, A. M., & Ponce Solórzano, H. X. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *RECIMUNDO*, 4(4), 4-12. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.4-12](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.4-12)

Reza Reyes, E. A. (2013). Caracterización estructural y cristalográfica del carbonato de litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) por microscopía electrónica y difracción de rayos X. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000687017>

Clavijo, J. (2013). *Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM)*. Revista Elementos, Número 3, 14 páginas.

Castellanos Cuéllar, I. C., Velandia Cabra, J. R., González Curbelo, M. Á., Varela Martínez, D. A., & Ramírez Valencia, E. (2018). Aplicaciones y generalidades de un espectrofotómetro de absorción atómica AA-700 de Shimadzu. Bogotá: Universidad EAN.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.

León Duharte, L., Landazury Yáñez, S., & Fernández Heredia, Á. (2006). La salmuera: Un procedimiento racional de análisis. *Revista Cubana de Química*, 18(1), 285. Universidad de Oriente.

## 7 CAPITULO VII ANEXO.

### 7.1. Anexo B: Tablas de pH.

Tabla 7.1

	Cantidad añadida Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ml)	pH
Salmuera	1	9,96
	2	9,81
	3	9,21
Salmuera evaporada	1	8,12
	2	8,46
	3	8,73
SrCl <sub>2</sub> +LiCl	1	12,13
	2	11,93
	3	11,66
LiCl	1	12,13
	2	12,25
	3	12,3
	10	12,13
	15	12,25
	20	12,3

Tabla 7.2

	Carbón activado (g)	pH
Salmuera	0,2	7,55
	0,4	7,7
	1	7,86
	2	8,19
	3	7,6
SrCl <sub>2</sub> +LiCl	0,2	8,97
	0,4	8,24
	1	8,12
	2	7,99
	3	8,86
LiCl	0,2	9,8
	0,4	9,48
	1	9,49
	2	9,1
	3	9,57
	6	9,9
	12	9,27
	24	8,35
	30	7,89
SrCl <sub>2</sub>	0,2	8,64
	0,4	8,53
	1	8,43
	2	8,33
	3	9,12

Tabla 7.3

	Cloruro de aluminio (ml)	pH
Salmuera	1	6,49
	3	6,55
	5	6,61
	10	6,7
	15	6,75
	20	7,83
Salmuera	1	6,49
	3	6,55
	5	6,61
	10	6,7
	15	6,75
	20	7,83

Tabla 7.4

	Resinas	pH
Salmuera	0,2	6,81
	0,4	7,17
	1	7,6
	2	7,66
	3	7,69
SrCl <sub>2</sub> +LiCl	0,2	4,95
	0,4	4,32
	1	3,56
	2	3,97
	3	3,87

Tabla 7.5

	Resinas(2)	pH
LiCl	0,2	5,56
	0,4	5,93
	1	4,67
	2	4,52
	3	4,47

